

## 5. ANÁLISE DA RESPOSTA DINÂMICA DA ESTRUTURA

### 5.1. Introdução

A resposta dinâmica do sistema (deslocamentos e tensões) é obtida mediante a integração das equações de movimento, no domínio do tempo. Considera-se inicialmente o efeito da mobilidade da carga e, em seguida, exclusivamente a excitação produzida pela interação entre os pneus dos veículos do comboio e a superfície irregular do tabuleiro. Neste capítulo são apresentados os valores obtidos nas análises do presente trabalho. Faz-se a validação dos deslocamentos para cada comboio de acordo com os resultados esperados obtidos por outra metodologia de estudo e ilustram-se os gráficos de tensões e deslocamento para cada exemplo.

### 5.2. Análise das frequências naturais e modos de vibração

Inicialmente, com base na simulação numérica realizada, são obtidas as frequências naturais e os modos de vibração da ponte rodoviária mista (aço-concreto). De acordo com os resultados apresentados na tabela 5.1, pode-se verificar que o valor da frequência fundamental ( $f_{01}$ ) da ponte estudada, de acordo com a presente metodologia de análise, praticamente coincide com os valores calculados com base no emprego de outras estratégias de análise Silva (1996), Murray et al (2003).

Tabela 5.1 - Frequências naturais da ponte obtidas, diferentes métodos de análise

Frequências Naturais da Ponte						GDYNABT	AISC
$f_{0i}$ (Hz), Ansys (2005)						Silva (1996)	Murray et al (2003)
$f_{01}$	$f_{02}$	$f_{03}$	$f_{04}$	$f_{05}$	$f_{06}$	$f_{01}$ (Hz)	$f_{01}$ (Hz)
<b>2,90</b>	3,64	6,87	9,63	11,03	12,85	<b>2,85</b>	<b>2,65</b>

A observação feita anteriormente, no tocante às frequências naturais, fornece um bom indicativo de coerência no que diz respeito ao modelo numérico-computacional desenvolvido e, bem como, aos resultados e conclusões obtidas ao longo dessa investigação.

Os modos de vibração apresentados no presente estudo, em termos de comportamento, estão de acordo com os estudos apresentados anteriormente por Ferreira (1999) e Pravia (2003) que se baseiam em pontes metálicas similares a desenvolvida nesse estudo.

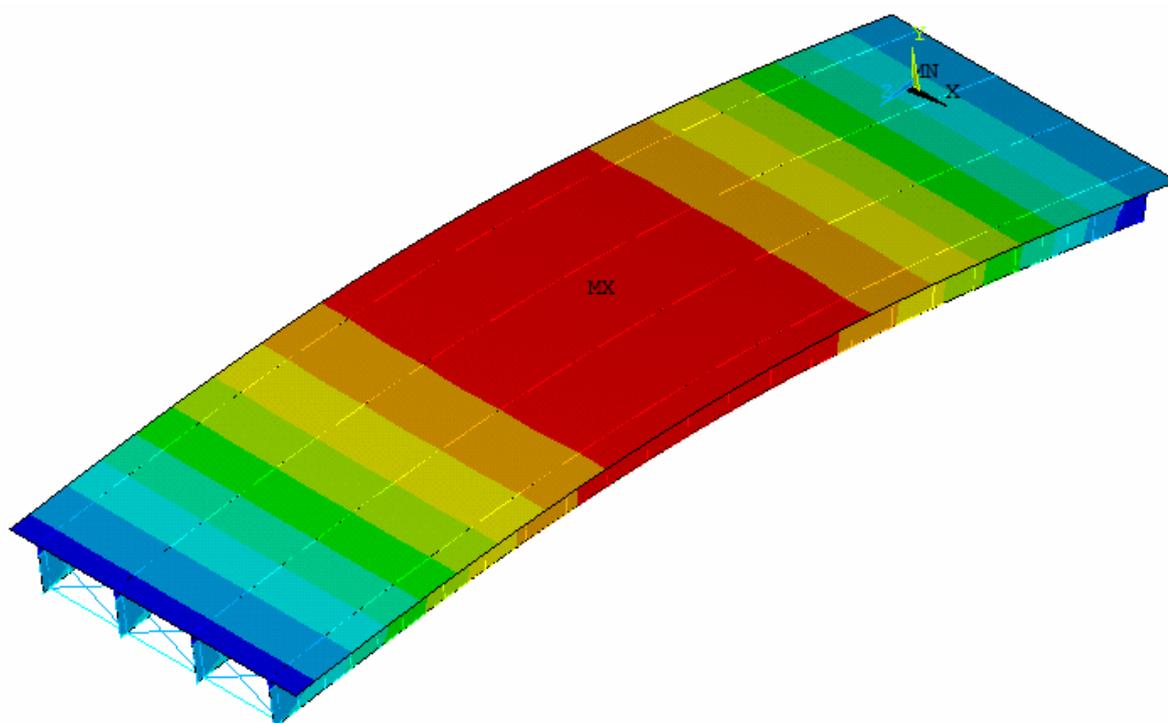
Na figura 5.1 é apresentado o primeiro modo de vibração referente à frequência fundamental da ponte. Nota-se que o valor da frequência fundamental da ponte,  $f_{01} = 2,90\text{Hz}$  é relativamente baixo, o que demonstra a alta flexibilidade da mesma. Tal flexibilidade enfatiza a necessidade de se analisar a resposta dinâmica para esse tipo de estrutura. Observa-se claramente, no primeiro modo de vibração ilustrado na figura 5.1, que se trata de um modo de flexão longitudinal. Esse primeiro modo é de especial interesse para a análise do comportamento dinâmico da estrutura quando submetida a carregamentos reais por apresentar uma frequência de vibração baixa e similar a muitas frequências de excitação oriundas da passagem de comboios de veículos conhecidos.

O segundo modo de vibração referente à torção axial da estrutura é ilustrado na figura 5.2. O valor da segunda frequência natural da estrutura também é relativamente baixo, o que demonstra o efeito e a importância da torção nesse tipo de estrutura.

Na figura 5.3 é apresentado o terceiro modo de vibração referente à flexão lateral das vigas. Esse modo já apresenta um valor bem maior que os dois primeiros, mas ainda assim é de interesse para uma análise de resposta dinâmica por apresentar acentuada flexão das vigas concentrados em determinados pontos fundamentais da estrutura.

As figuras 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam o segundo modo de flexão longitudinal, o segundo modo de torção axial e o modo de flexão transversal das lajes e diafragmas, respectivamente. Tratam-se de modos mais complexos e menos importantes para uma análise de resposta dinâmica uma vez que apresentam valores de frequência natural bem elevados. Dificilmente esses modos de vibração irão ocorrer em estruturas reais sem que problemas relacionados aos três primeiros modos possam ser identificados anteriormente.

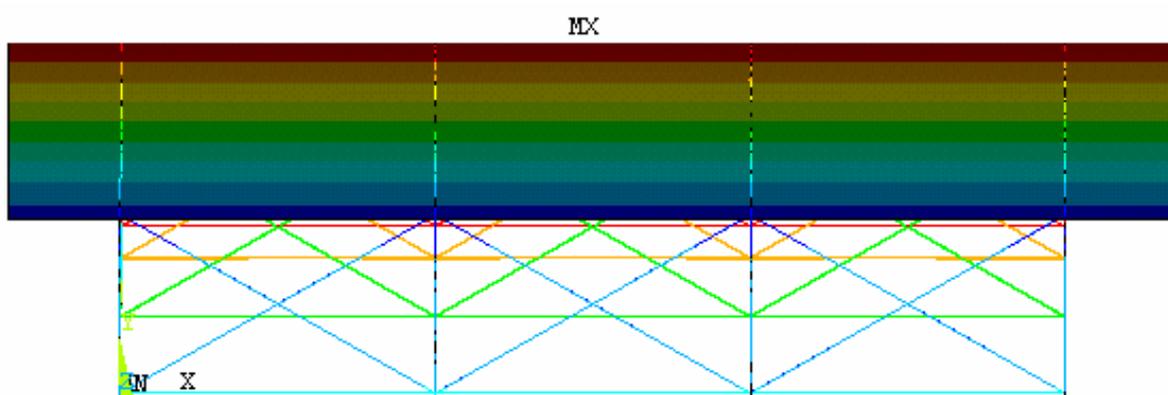
As figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6, a seguir, ilustram os seis primeiros modos de vibração correspondentes frequências naturais do modelo estrutural em estudo.



(a).Perspectiva

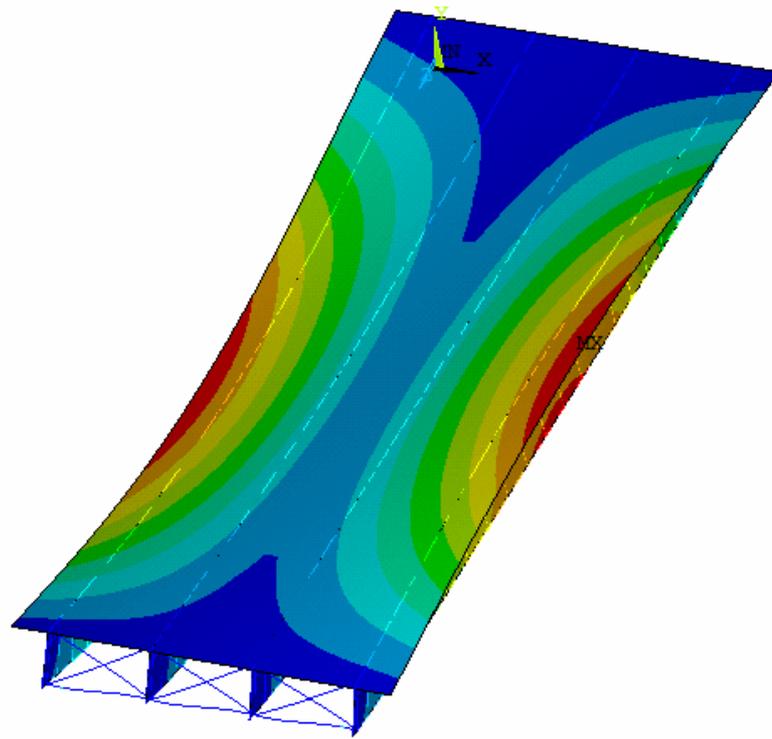


(b) Vista longitudinal.

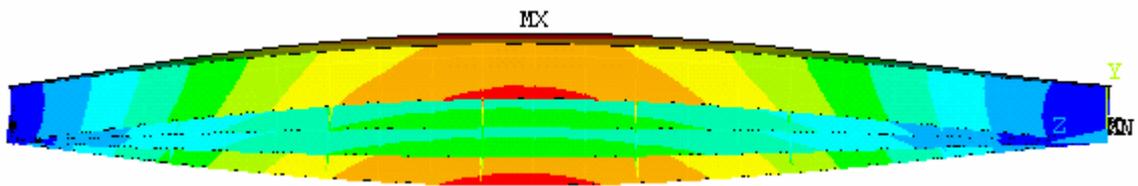


(c).Vista frontal

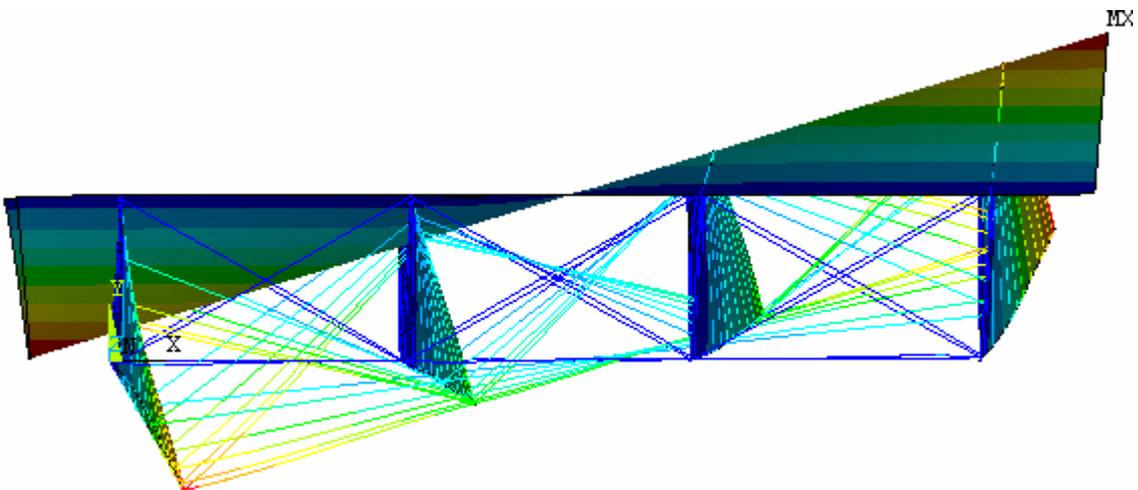
Figura 5.1 - 1° Modo de vibração da ponte,  $f_{01}=2,90\text{Hz}$



(a).Perspectiva

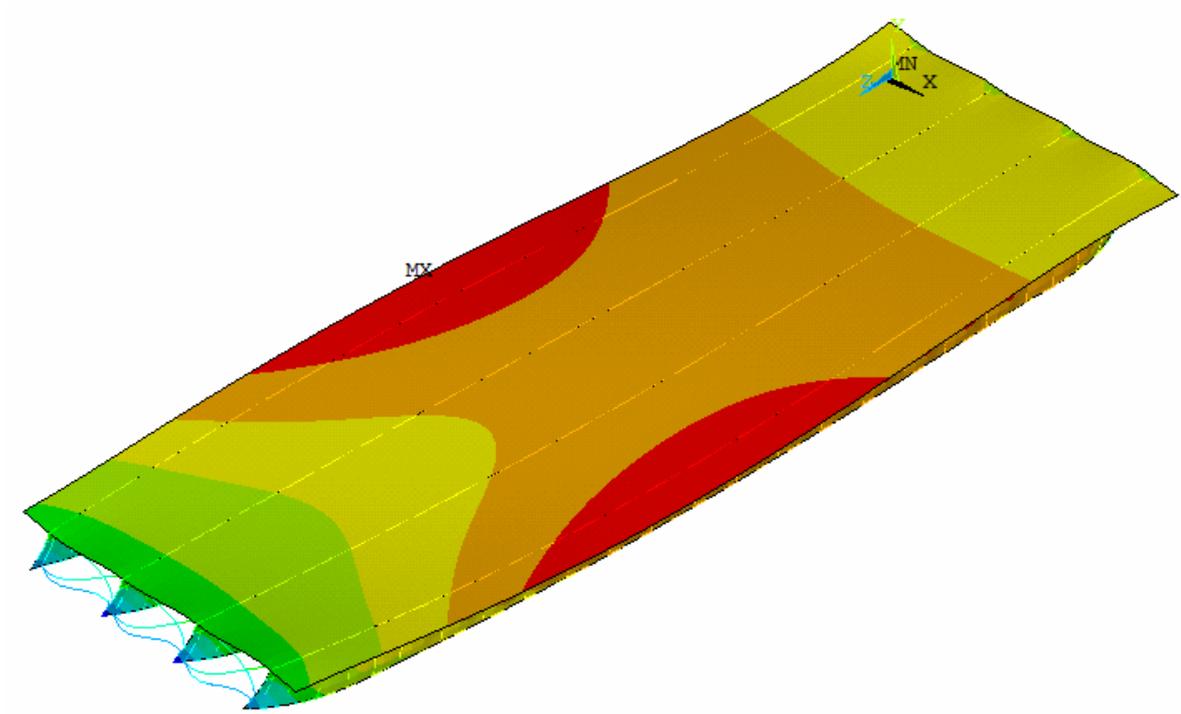


(b) Vista longitudinal.

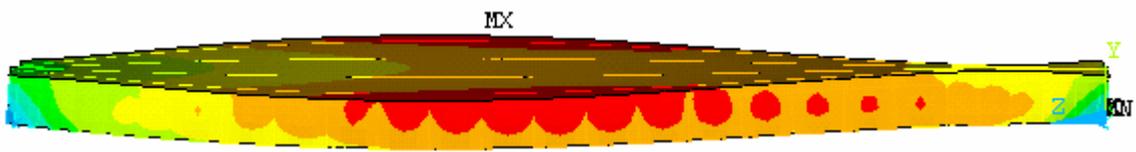


(c).Vista frontal

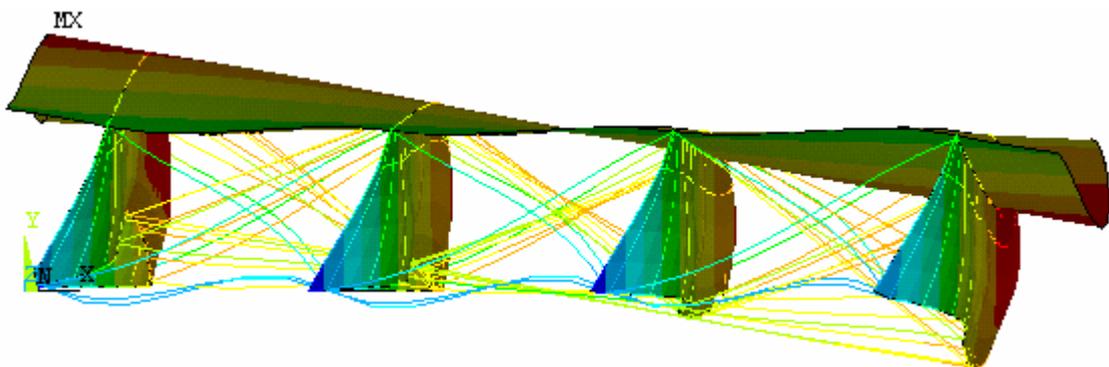
Figura 5.2 - 2º Modo de vibração,  $f_{02}=3,64\text{Hz}$



(a).Perspectiva

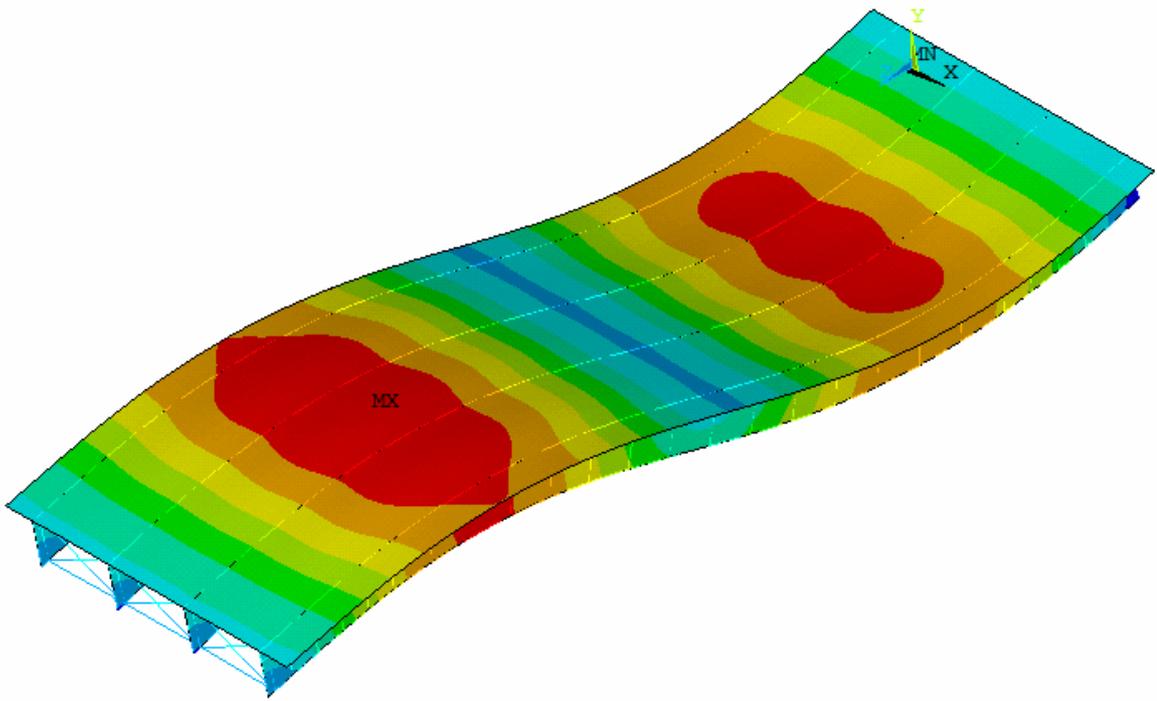


(b) Vista longitudinal.

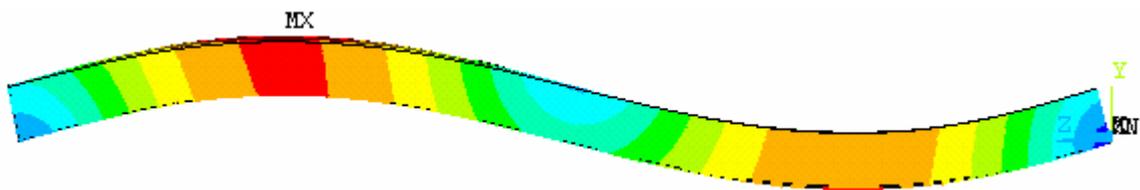


(c).Vista frontal

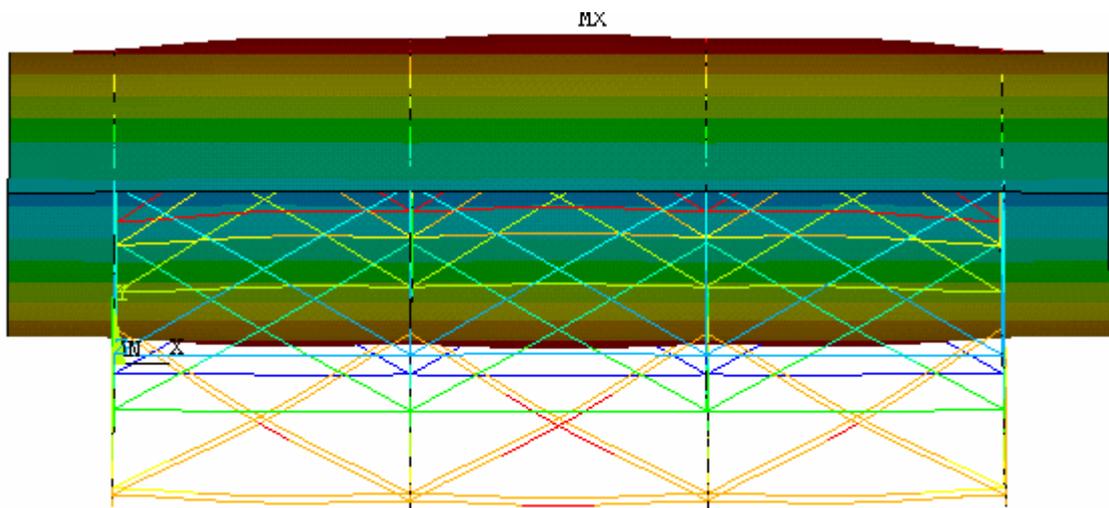
Figura 5.3 - 3º Modo de vibração,  $f_{03}=6,87\text{Hz}$



(a).Perspectiva

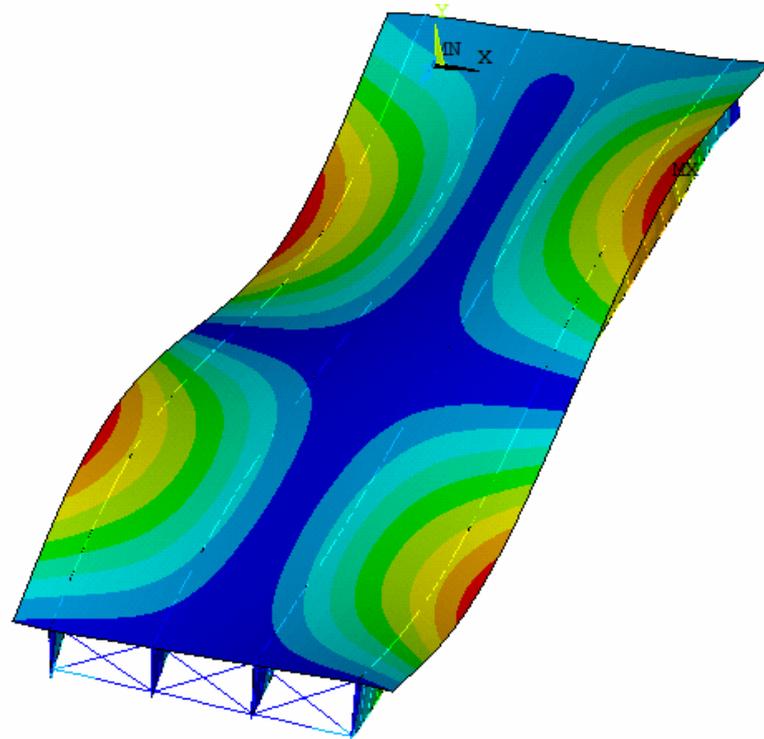


(b) Vista longitudinal.

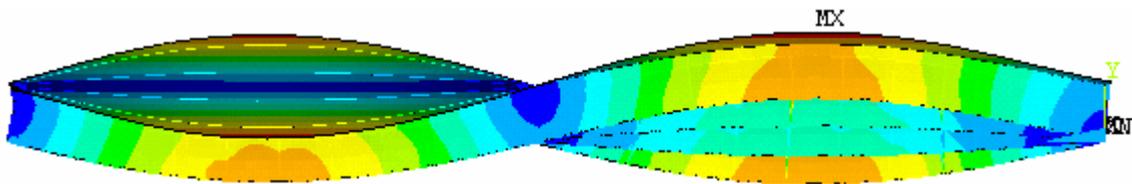


(c).Vista frontal

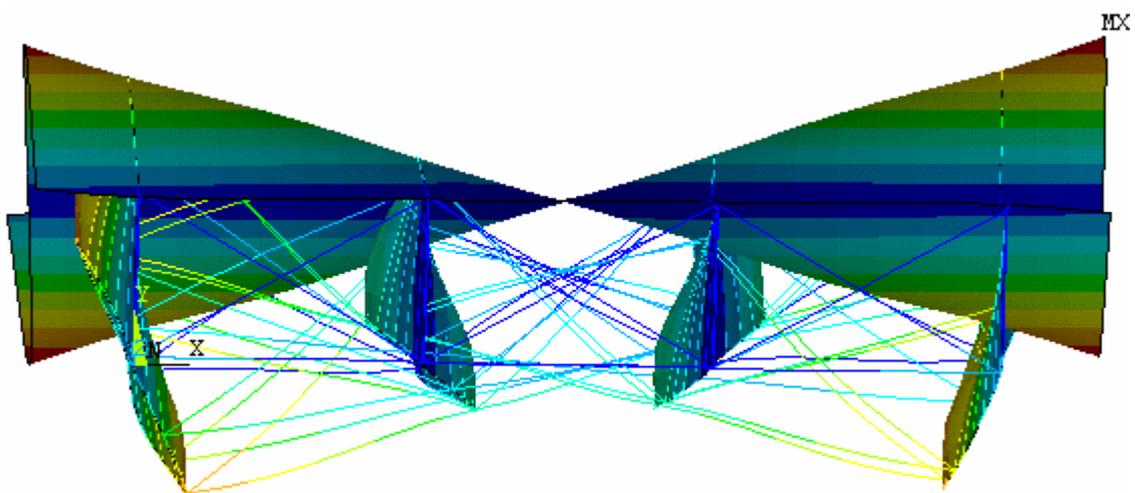
Figura 5.4 - 4º Modo de vibração,  $f_{04}=9,63\text{Hz}$



(a).Perspectiva

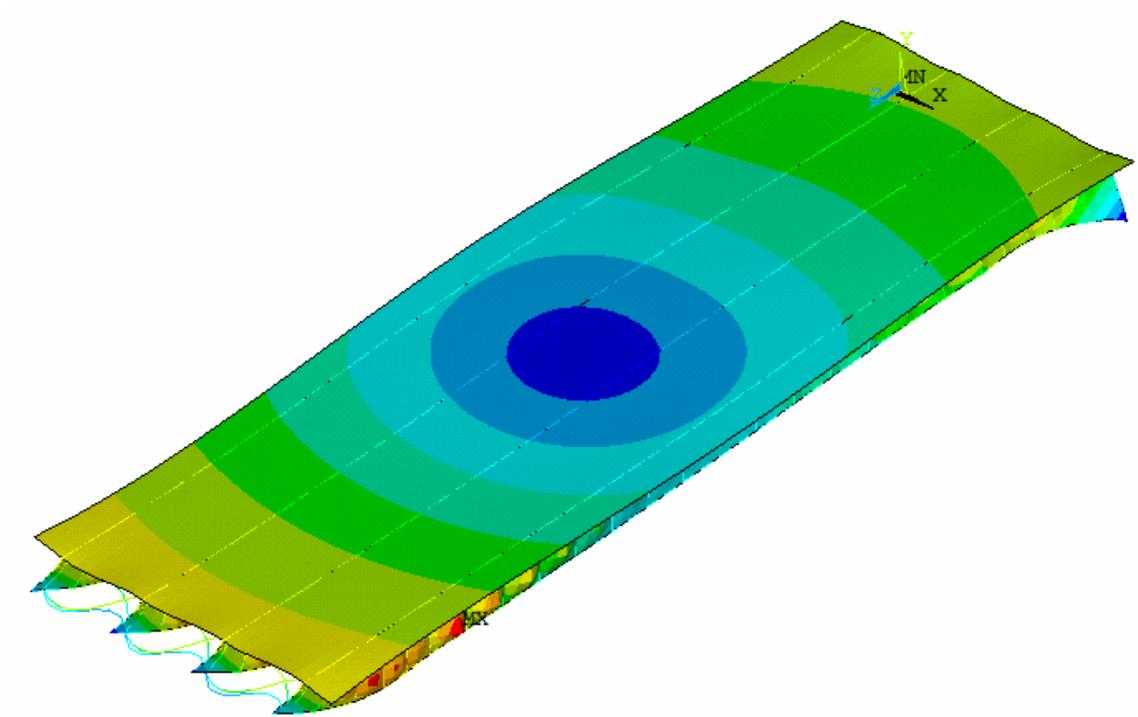


(b) Vista longitudinal.

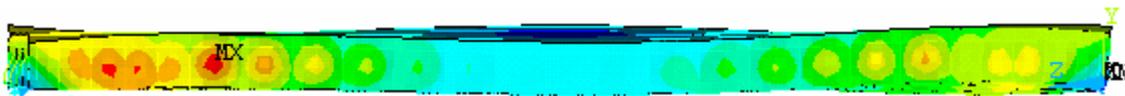


(c).Vista frontal

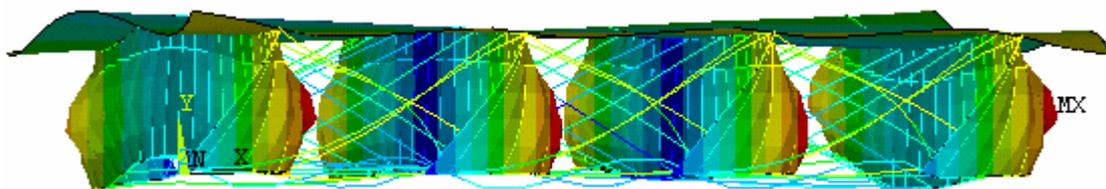
Figura 5.5 - 5º Modo de vibração,  $f_{05}=11,03\text{Hz}$



(a).Perspectiva



(b) Vista longitudinal.



(c).Vista frontal

Figura 5.6 - 6° Modo de vibração,  $f_{06}=12,85\text{Hz}$

### 5.3. Validação da estratégia de carregamento desenvolvida

É de fundamental importância que a estratégia de carregamento desenvolvida represente, o mais próximo possível, o comportamento da estrutura. Desta forma, para que os resultados obtidos estejam de acordo com esse comportamento, faz-se necessária a validação da estratégia de carregamento desenvolvida para esta dissertação. No presente estudo, a validação da estratégia de carregamento foi feita através da comparação dos resultados obtidos a partir da metodologia de análise empregada anteriormente por outros autores, Almeida (2006) e Silva (1996).

#### 5.3.1. Efeito da mobilidade da carga

Para validar a estratégia de carregamentos desenvolvida no presente estudo, a figura 5.7 ilustra os deslocamentos obtidos no meio do vão, através da mobilidade da carga referente ao comboio I. A figura em questão apresenta os valores do FAD (Fator de amplificação dinâmico) ao longo das passagens sobre a ponte,  $t/t_1$  (Razão entre o tempo de passagem e o tempo de uma passagem).

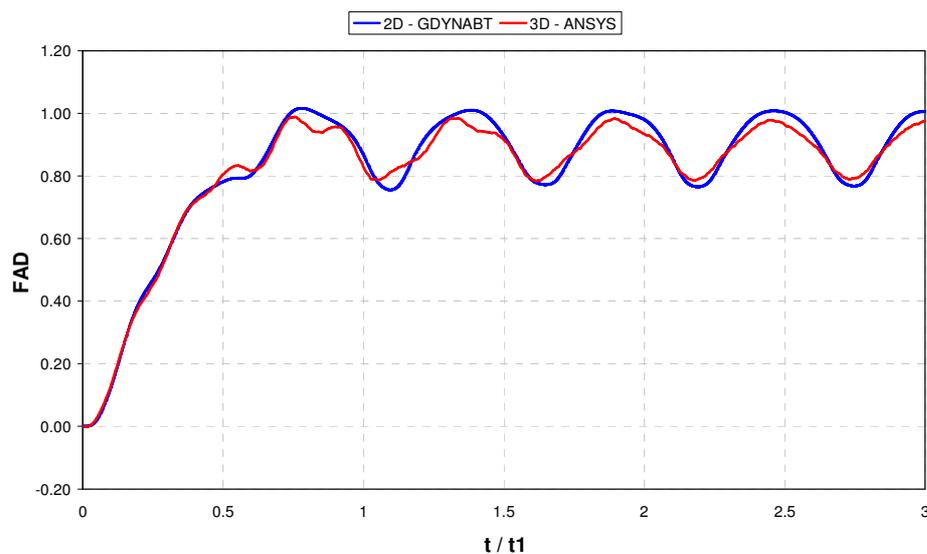


Figura 5.7 - Comboio I, velocidade de 80km/h, deslocamentos translacionais verticais na seção central da ponte

Da mesma maneira a figura 5.8 apresenta os deslocamentos translacionais verticais obtidos no meio do vão, através da mobilidade da carga referente ao comboio II. A figura em questão apresenta os valores do FAD (Fator de amplificação dinâmico) ao longo das passagens sobre a ponte,  $t/t_1$  (Razão entre o tempo de passagem e o tempo de uma passagem).

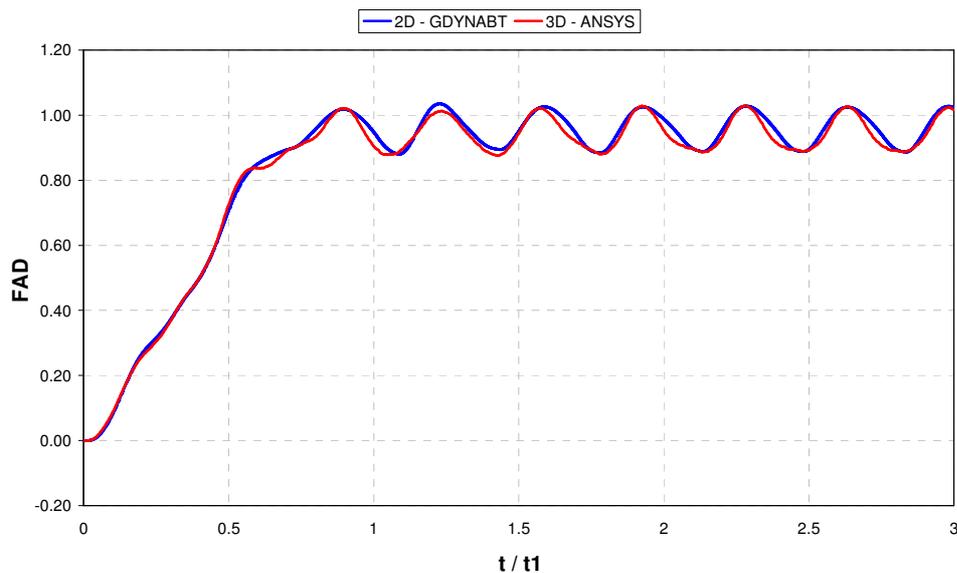


Figura 5.8 - Comboio II, velocidade de 80km/h, deslocamentos translacionais verticais na seção central da ponte

Os estudos anteriormente desenvolvidos por Chantre (2008), Amorim (2007), Leitão (2006), Almeida (2006) e Silva (1996) utilizaram a ferramenta computacional GDYNABT, Silva (1996) para obtenção de resultados. Dessa forma as figuras 5.7 e 5.8 ilustram os resultados obtidos através do Ansys (2005) e através do GDYNABT, Silva (1996).

Observa-se que os resultados obtidos, em termos dos deslocamentos translacionais verticais, com base na metodologia de análise desenvolvida neste estudo, apresenta uma boa concordância de valores quando comparados com metodologias de estudos anteriores, Chantre (2008), Amorim (2007), Leitão (2006), Almeida (2006) e Silva (1996), no que diz respeito à mobilidade de carga.

### 5.3.2. Efeito das irregularidades da pista

Com o mesmo objetivo, a análise dos valores dos deslocamentos translacionais verticais obtidos através da passagem dos comboios sobre as irregularidades da pista, visa validar a estratégia de carregamentos desenvolvida no presente estudo. A figura 5.9 ilustra os deslocamentos translacionais verticais obtidos no meio do vão, através da passagem do comboio I sobre a irregularidade da pista com qualidade excelente. A figura em questão apresenta os valores do FAD (Fator de amplificação dinâmico) ao longo das passagens sobre a ponte,  $t/t_1$  (Razão entre o tempo de passagem e o tempo de uma passagem).

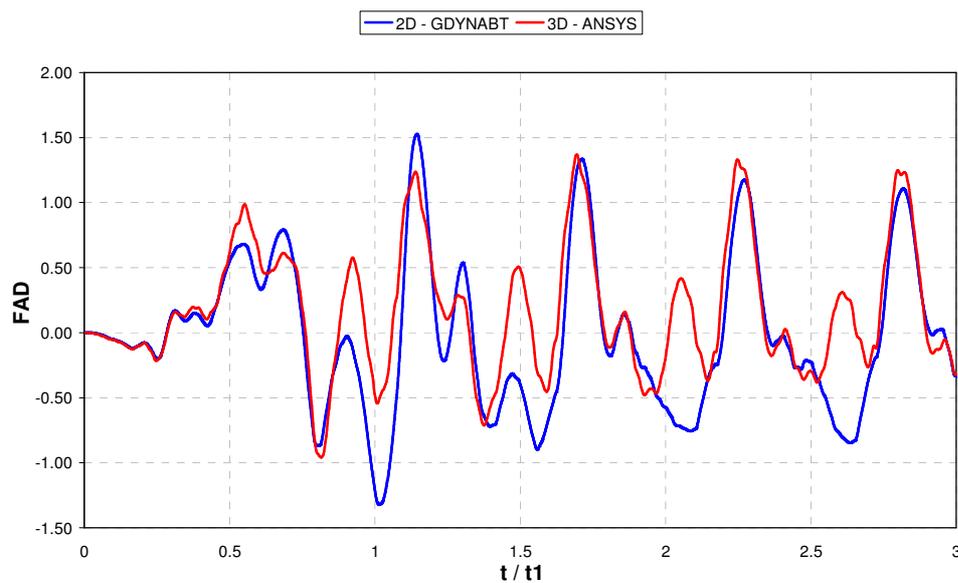


Figura 5.9 - Comboio I, velocidade de 80km/h, deslocamentos translacionais verticais na seção central da ponte, qualidade da pista excelente

Analogamente a figura 5.10 apresenta os deslocamentos translacionais verticais obtidos no meio do vão, através da passagem do comboio II sobre a irregularidade da pista. A figura em questão apresenta os valores do FAD (Fator de amplificação dinâmico) ao longo das passagens sobre a ponte,  $t/t_1$  (Razão entre o tempo de passagem e o tempo de uma passagem).

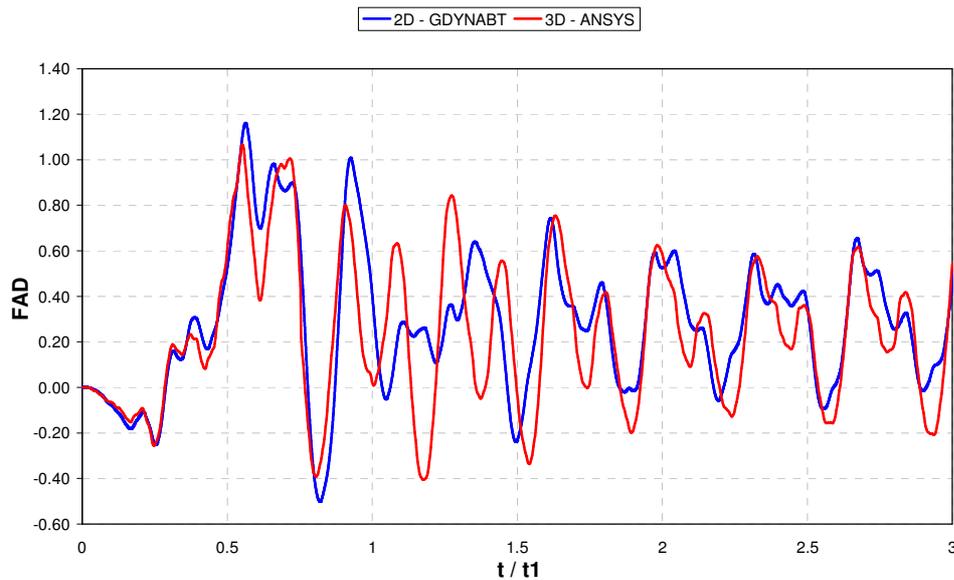


Figura 5.10 - Comboio II, velocidade de 80km/h, deslocamentos translacionais verticais na seção central da ponte, qualidade da pista excelente

Do mesmo modo, o método comparativo utilizado para mobilidade de carga foi também utilizado para o estudo dos deslocamentos mediante a passagem dos comboios sobre a irregularidade da pista. As figuras 5.9 e 5.10 ilustram os gráficos obtidos através dos resultados alcançados via Ansys (2005) e via ferramental computacional GDYNABT, Silva (1996).

Para os valores dos deslocamentos referentes às irregularidades do pavimento, figuras 5.9 e 5.10, o comportamento do FAD (Fator de amplificação dinâmico) apresenta pequenas diferenças. Essas diferenças podem ser atribuídas, por exemplo, pelo fato de que a definição do amortecimento estrutural é absolutamente distinta para cada metodologia de análise. Um outro fator de importância diz respeito à própria natureza do modelo estrutural tridimensional em comparação com o caso bidimensional.

De certa forma, pode-se observar também que a metodologia desenvolvida, obteve valores aceitáveis dentro das diferenças existentes entre as metodologias de análise, no que diz respeito às irregularidades da pista, comprovando que o comportamento do modelo matemático tridimensional desenvolvido apresenta boa concordância quando comparado com estudos anteriores Chantre (2008), Amorim (2007), Leitão (2006), Almeida (2006) e Silva (1996).

### 5.3.3. Considerações sobre os fatores de amplificação dinâmicos

Analisando-se os gráficos das figuras 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 foi observado que as amplificações dinâmicas para a ponte em estudo (modelo matemático tridimensional), devidas ao efeito da mobilidade dos veículos, não são muito elevadas, sendo próximas da unidade. Contudo, essas amplificações crescem, substancialmente, chegando mesmo a ultrapassar os efeitos devidos a presença estática dos veículos, quando se considera o efeito oriundo da interação dinâmica das viaturas dos comboios com as irregularidades da pista, mesmo adotando-se um pavimento de qualidade excelente.

Os gráficos referentes às irregularidades do pavimento se apresentam diferentes nas figuras 5.9 e 5.10, pois são gerados a partir de modelos de irregularidade aleatórios diferentes, além de estarem sendo submetidos a carregamentos distintos.

Constata-se ainda na fase transiente dos gráficos, figuras 5.7 a 5.10, a sucessiva entrada na ponte dos veículos dos comboios. Essa constatação pode ser observada pelas mudanças bruscas da curva nos instantes em que esses veículos encontram-se na posição correspondente ao tempo que os separa dos veículos anteriores. Assim sendo, as curvas representativas da resposta dinâmica do sistema deslocam-se para a direita com amplificações bem mais elevadas, até que as pontes estejam completamente carregadas e os sistemas atinjam a fase permanente da resposta.

Finalmente, cabe ressaltar que ao longo do estudo foi observado que os valores dos fatores de amplificação dinâmicos, no que tange aos deslocamentos translacionais verticais e esforços, oriundos da interação dos pneus dos veículos dos comboios com a superfície irregular do tabuleiro das obras de arte são bastante elevados, na razão direta do decréscimo da qualidade da pista. É importante ressaltar que os valores apresentados para a mobilidade da carga e para irregularidade da pista são apresentados separadamente, ou seja, os valores reais de FAD deverão ser o somatório dos valores obtidos pela mobilidade da carga e pela irregularidade da pista.

#### 5.4. Resultados obtidos na análise dinâmica

Uma vez a estratégia de carregamento validada, se faz necessária à obtenção dos históricos de tensão para os locais aonde se deseja analisar o comportamento dos elementos estruturais. Os valores de tensão utilizados no presente estudo foram obtidos nos nós de ligação entre a mesa inferior e a alma da viga, exceto para as tensões cisalhantes, obtidas no meio da alma da viga.

De forma a representar de uma melhor maneira esses locais, a figura 5.11 apresenta a seção transversal com as respectivas indicações das vigas.

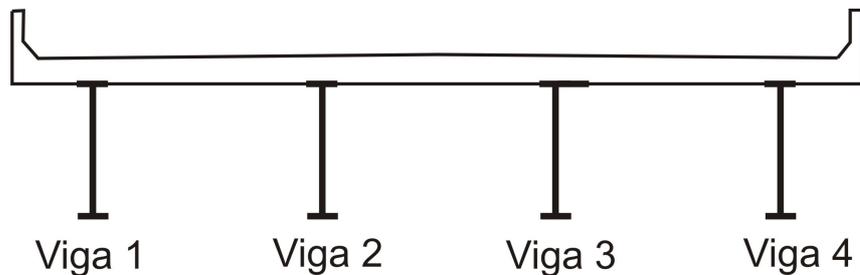


Figura 5.11 - Seção transversal com indicação das vigas

A figura 5.12 ilustra, em vista superior os locais aonde foram obtidas as tensões. Esses locais estão descritos na tabela 5.2.

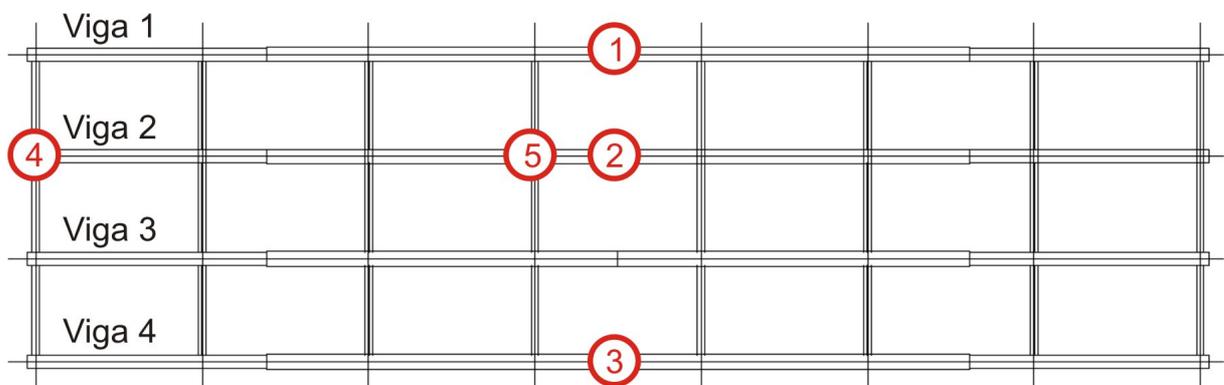


Figura 5.12 - Vista superior com indicação dos locais para análise das tensões

Tabela 5.2 - Descrição dos pontos para análise das tensões

Locais de análise	Descrição	Viga
Região 1	Meio do vão	1
Região 2	Meio do vão	2
Região 3	Meio do vão	4
Região 4	Apoio	2
Região 5	No diafragma	4

Para o presente estudo, a estrutura é carregada de duas maneiras distintas, sendo a primeira através da passagem dos comboios de veículos pela faixa referente à pista central, figura 5.13, e a segunda através da passagem dos comboios pela faixa referente à pista lateral entre as vigas 1 e 2, figura 5.14. Os casos de carregamento do presente estudo são demonstrados na tabela 5.3.

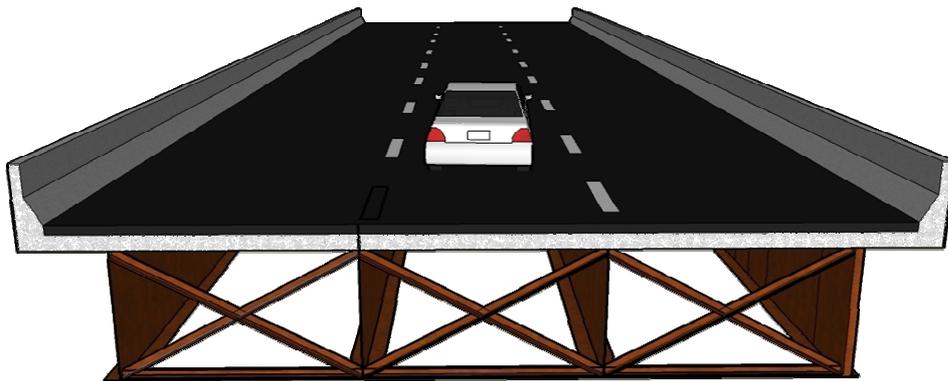
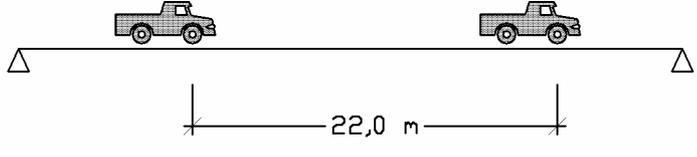
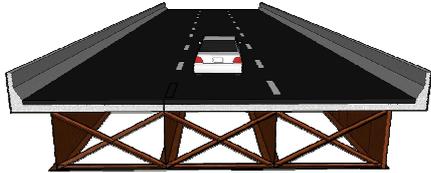
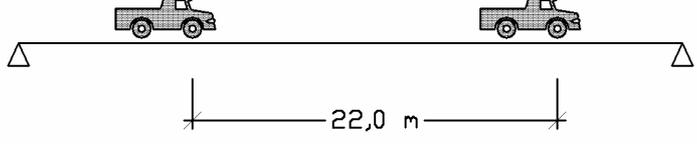
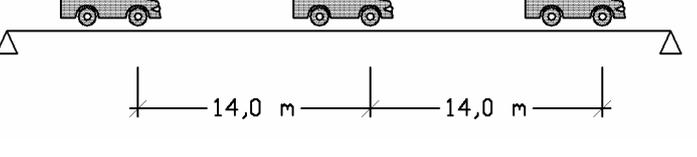
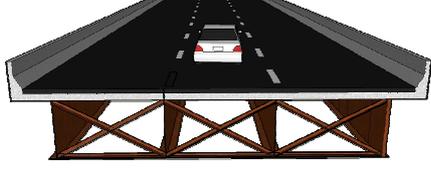
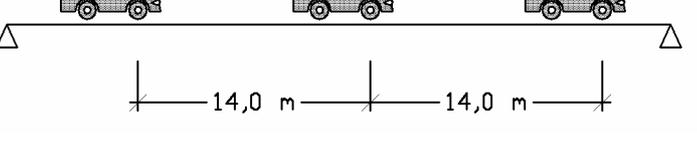


Figura 5.13 - Passagem dos comboios pela pista central



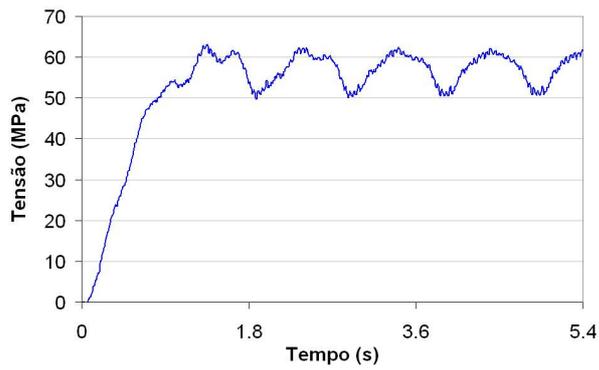
Figura 5.14 - Passagem dos comboios pela pista lateral

Tabela 5.3 - Tabela ilustrativa dos casos de carregamento em estudo

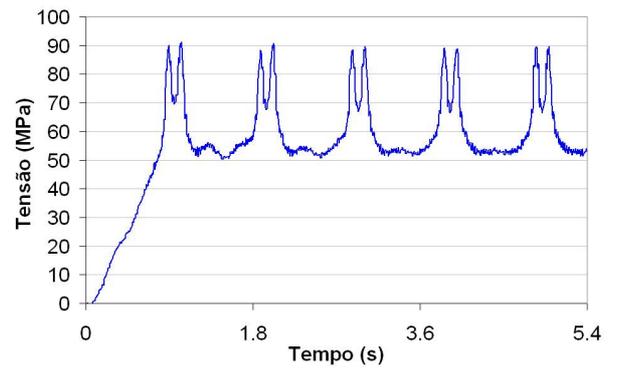
Caso 1	Comboio I	Faixa central da ponte
		
Caso 2	Comboio I	Faixa lateral da ponte
		
Caso 3	Comboio II	Faixa central da ponte
		
Caso 4	Comboio II	Faixa lateral da ponte
		

#### 5.4.1. Comboio I com velocidade de 80km/h na faixa central da ponte - Caso 1

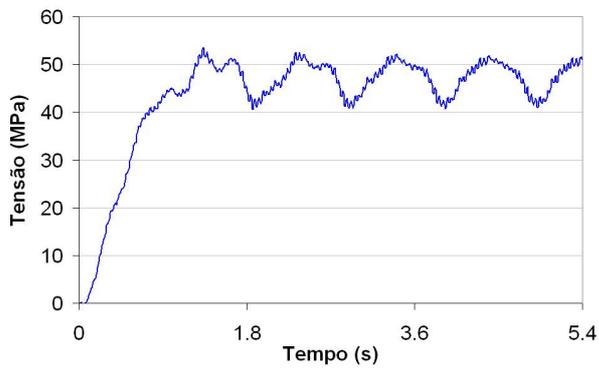
As figuras 5.15 e 5.16 apresentam os históricos de tensão para a passagem do comboio I pela faixa central da ponte. Demonstram-se os valores obtidos referentes à resposta dinâmica da ponte em estudo, no domínio do tempo, para os pontos mapeados, de acordo com a figura 5.12 e com a tabela 5.2. São considerados os efeitos da mobilidade da carga (efeito do peso), figura 5.15, e das irregularidades superficiais, figura 5.16, considerando-se um pavimento de qualidade excelente.



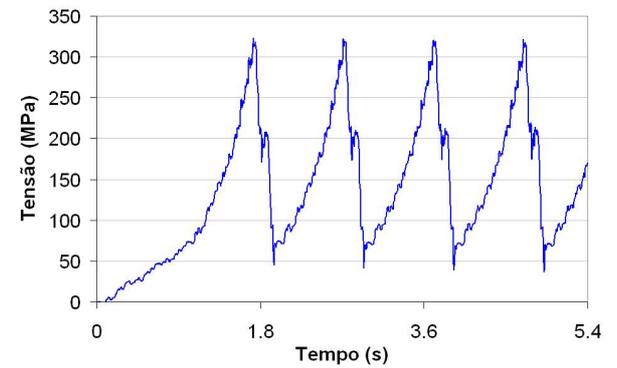
a) Histórico de tensões normais - Região 1



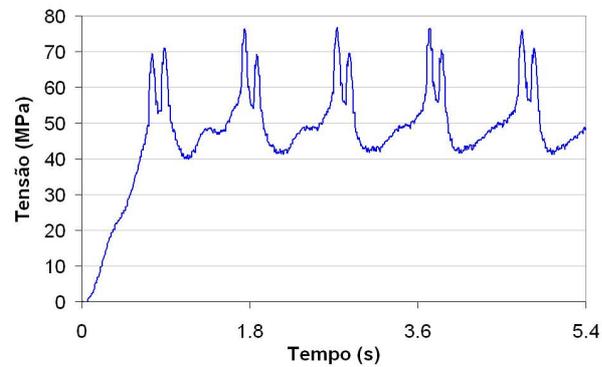
b) Histórico de tensões normais - Região 2



c) Histórico de tensões normais - Região 3

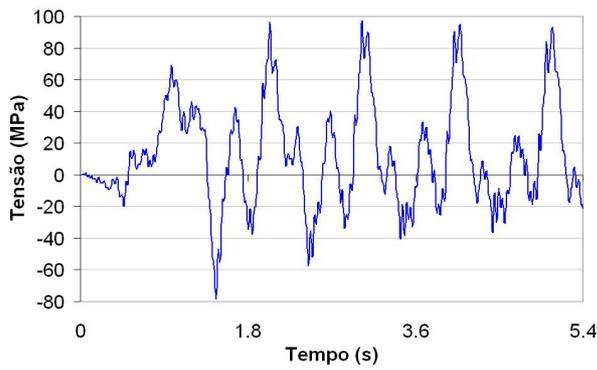


d) Hist. de tensões cisalhantes - Região 4

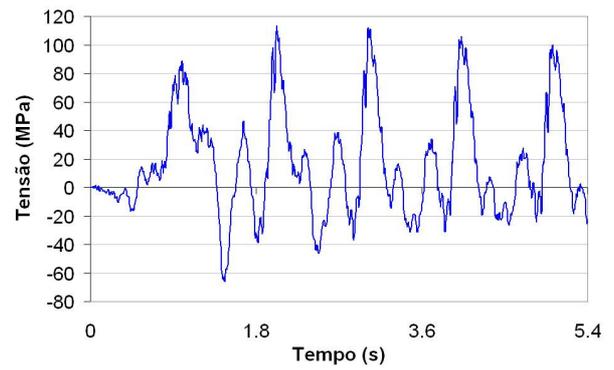


e) Histórico de tensões normais - Região 5

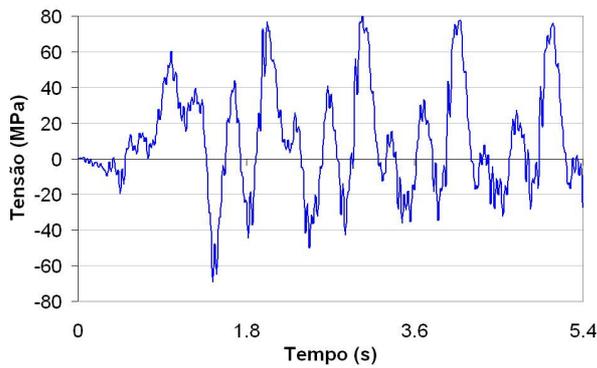
Figura 5.15 - Efeito da mobilidade de carga para o caso 1



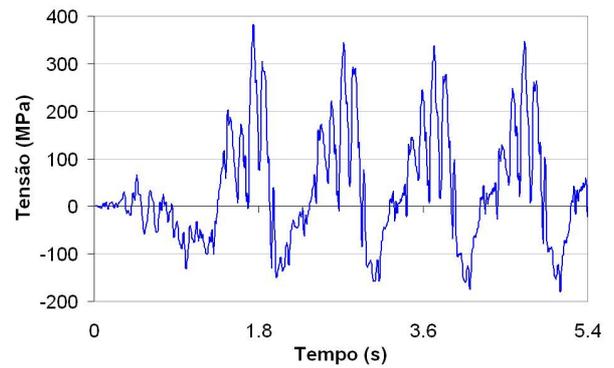
a) Histórico de tensões normais - Região 1



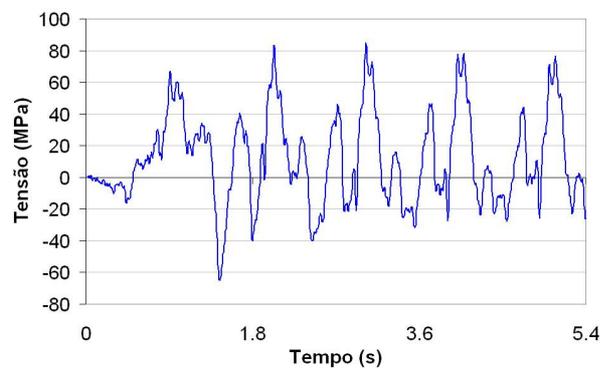
b) Histórico de tensões normais - Região 2



c) Histórico de tensões normais - Região 3



d) Hist. de tensões cisalhantes - Região 4



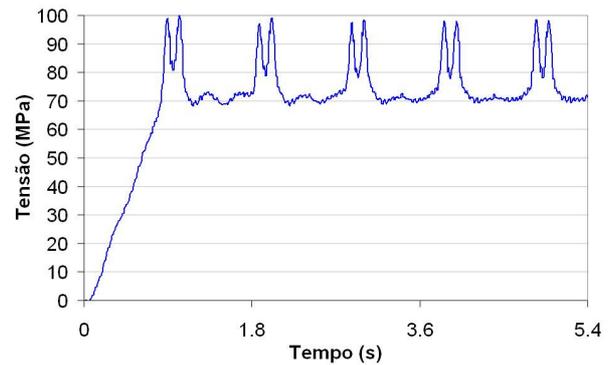
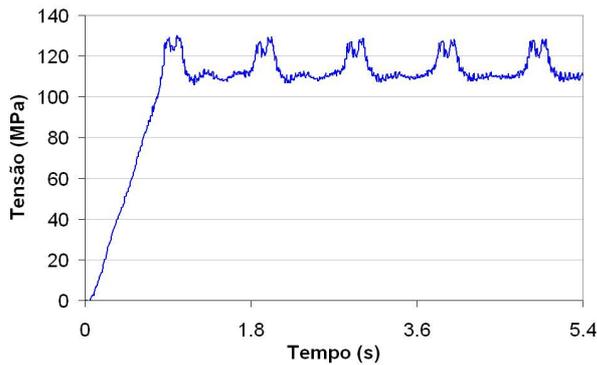
e) Histórico de tensões normais - Região 5

Figura 5.16 - Efeito das irregularidades da pista para o caso 1

#### 5.4.2. Comboio I com velocidade de 80km/h na faixa lateral da ponte - Caso 2

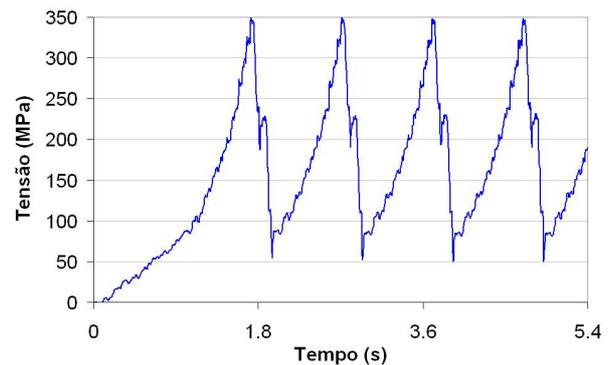
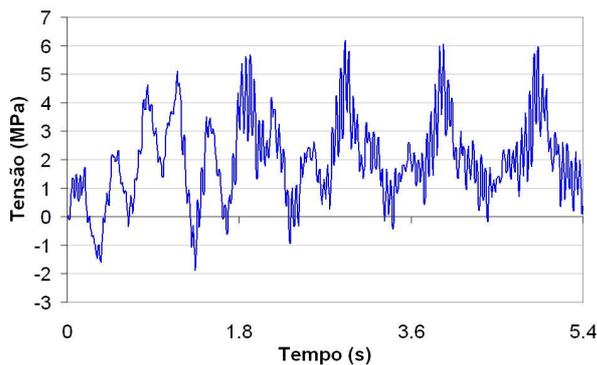
Na seqüência do texto são apresentadas às figuras 5.17 e 5.18, que ilustram os históricos de tensão para a passagem do comboio I pela faixa lateral da ponte. Os valores referentes à resposta dinâmica da ponte em estudo, no domínio do

tempo, para os pontos mapeados, são apresentados de acordo com a figura 5.12 e com a tabela 5.2. São considerados os efeitos da mobilidade da carga (efeito do peso), figura 5.17, e das irregularidades superficiais, figura 5.18, considerando-se um pavimento de qualidade excelente.



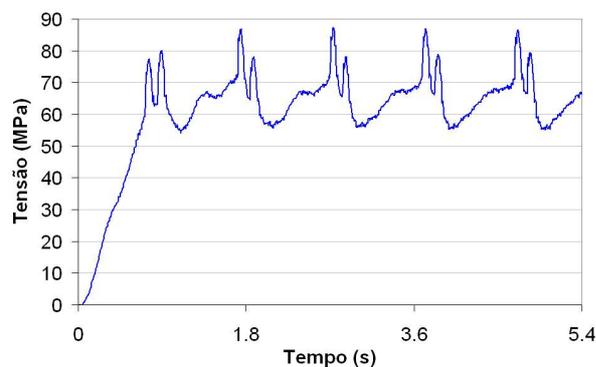
a) Histórico de tensões normais - Região 1

b) Histórico de tensões normais - Região 2



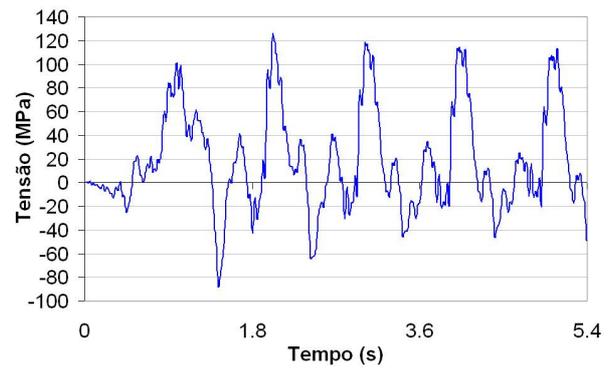
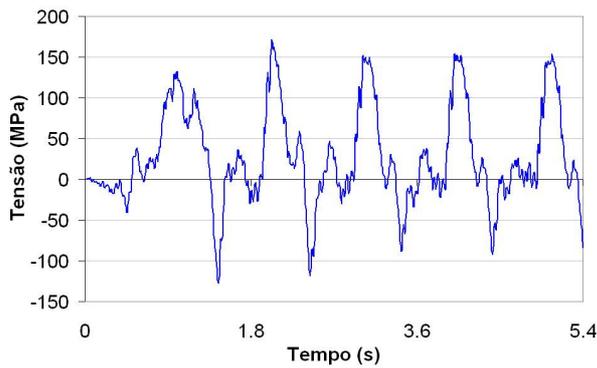
c) Histórico de tensões normais - Região 3

d) Hist. de tensões cisalhantes - Região 4



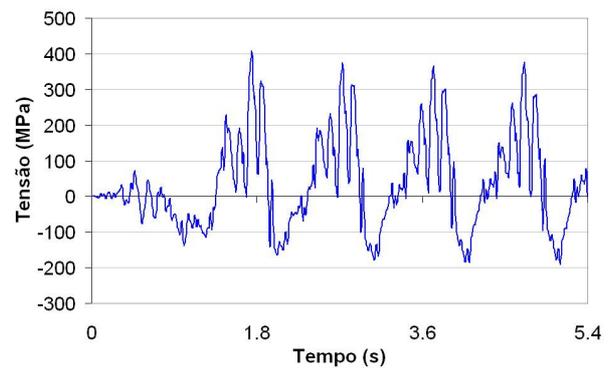
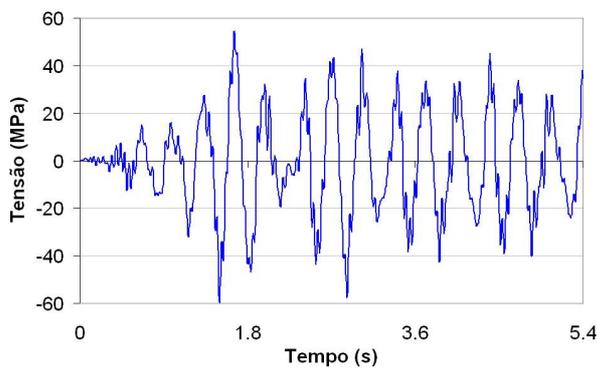
e) Histórico de tensões normais - Região 5

Figura 5.17 - Efeito da mobilidade de carga para o caso 2



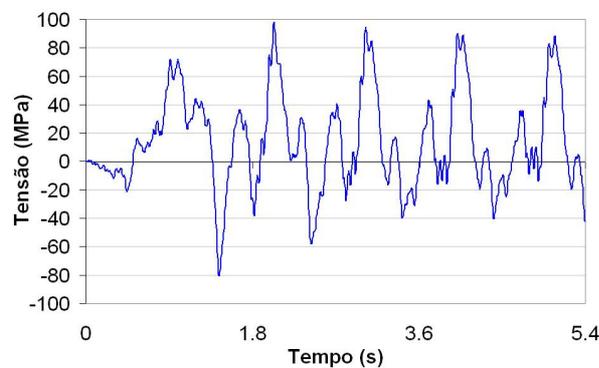
a) Histórico de tensões normais - Região 1

b) Histórico de tensões normais - Região 2



c) Histórico de tensões normais - Região 3

d) Hist. de tensões cisalhantes - Região 4



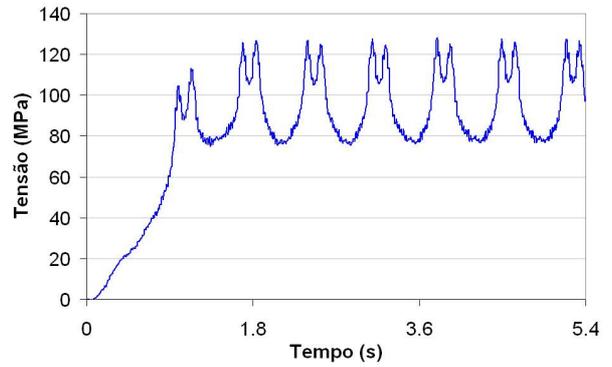
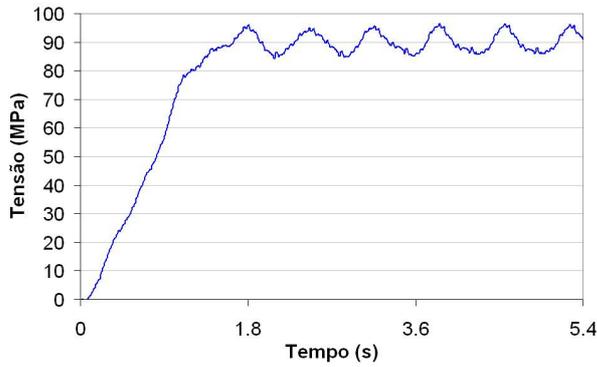
e) Histórico de tensões normais - Região 5

Figura 5.18 - Efeito das irregularidades da pista para o caso 2

### 5.4.3. Comboio II com velocidade de 80km/h na faixa central da ponte - Caso 3

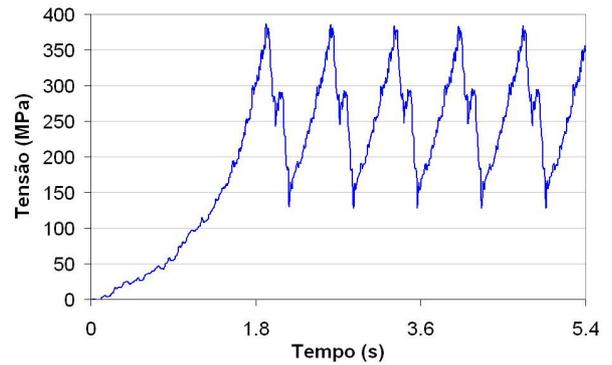
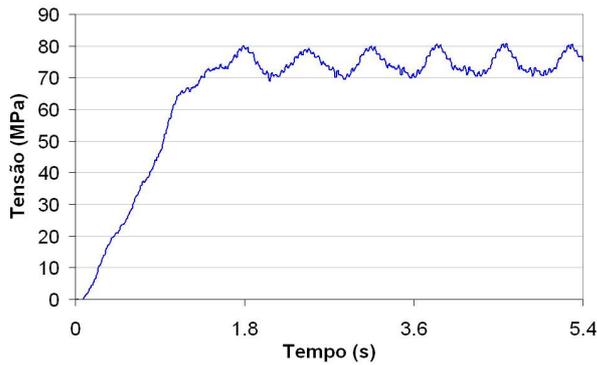
Da mesma maneira que o comboio I, às figuras 5.19 e 5.20 apresentam, para o comboio II na faixa central, a resposta dinâmica da ponte em estudo, no domínio do tempo, com base nos históricos de tensões para os pontos mapeados, de acordo

com a figura 5.12 e com a tabela 5.2. São considerados os efeitos da mobilidade da carga (efeito do peso), figura 5.19, e das irregularidades superficiais, figura 5.20, considerando-se um pavimento de qualidade excelente.



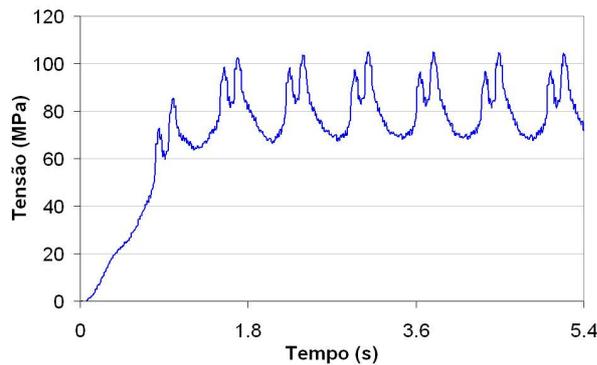
a) Histórico de tensões normais - Região 1

b) Histórico de tensões normais - Região 2



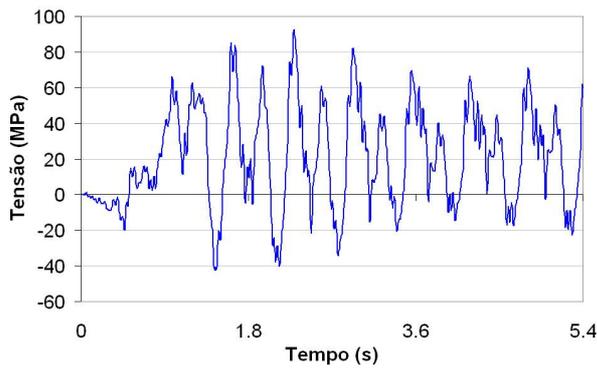
c) Histórico de tensões normais - Região 3

d) Hist. de tensões cisalhantes - Região 4

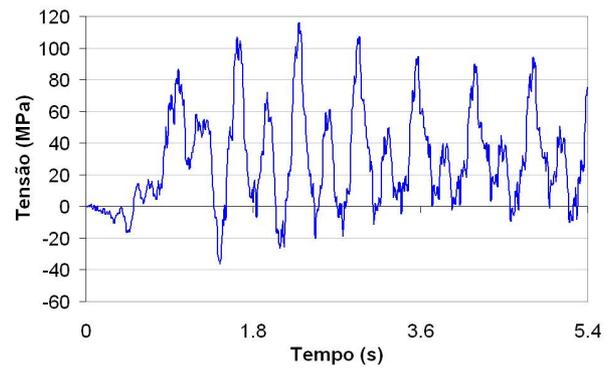


e) Histórico de tensões normais - Região 5

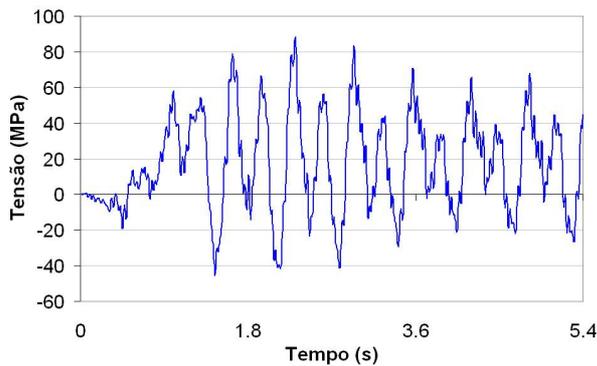
Figura 5.19 - Efeito da mobilidade de carga para o caso 3



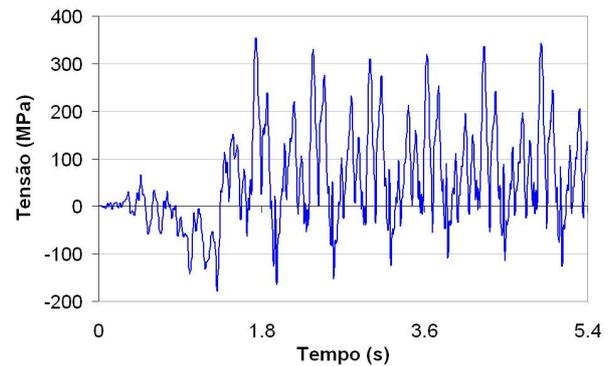
a) Histórico de tensões normais - Região 1



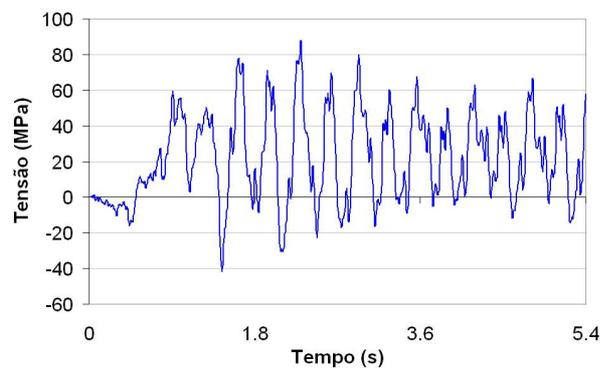
b) Histórico de tensões normais - Região 2



c) Histórico de tensões normais - Região 3



d) Hist. de tensões cisalhantes - Região 4



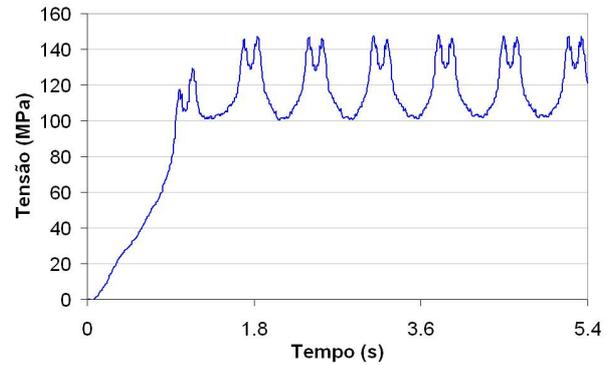
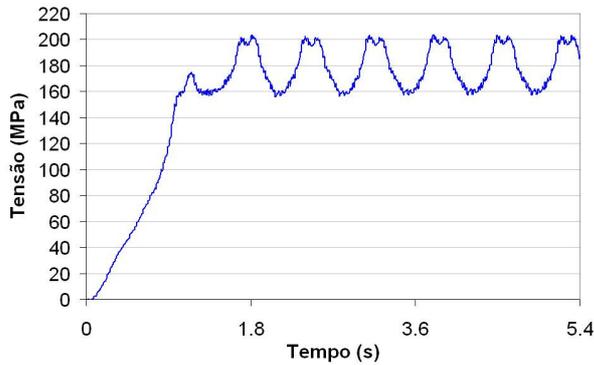
e) Histórico de tensões normais - Região 5

Figura 5.20 - Efeito das irregularidades da pista para o caso 3

#### 5.4.4. Comboio II com velocidade de 80km/h na faixa lateral da ponte - Caso 4

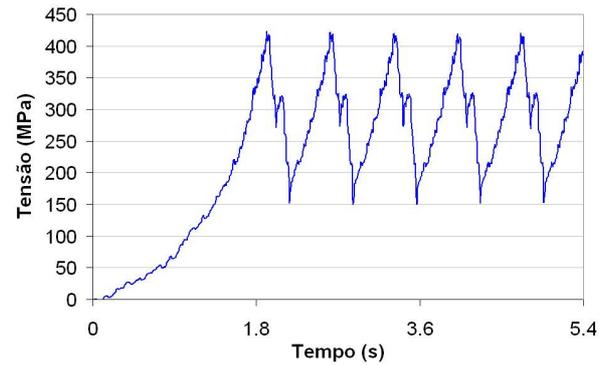
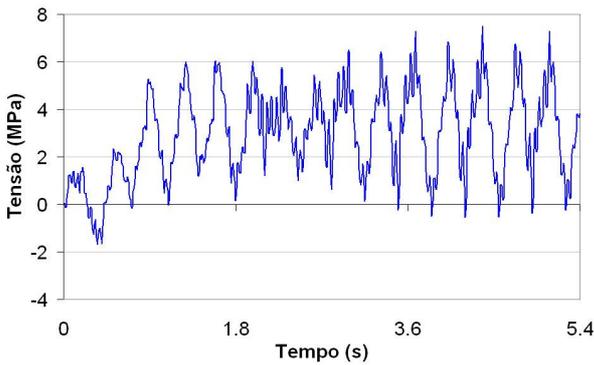
Na seqüência do texto são apresentadas às figuras 5.21 e 5.22, referentes à resposta dinâmica da ponte em estudo, para passagem do comboio II pela faixa lateral. Os valores foram obtidos no domínio do tempo, com base nos históricos de

tensões para os pontos mapeados. São considerados os efeitos da mobilidade da carga (efeito do peso), figura 5.21, e das irregularidades superficiais, figura 5.22, considerando-se um pavimento de qualidade excelente.



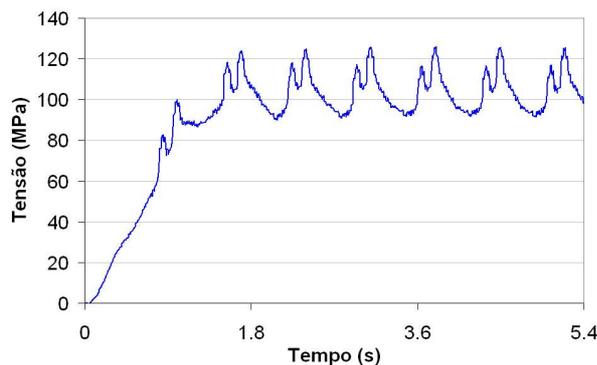
a) Histórico de tensões normais - Região 1

b) Histórico de tensões normais - Região 2



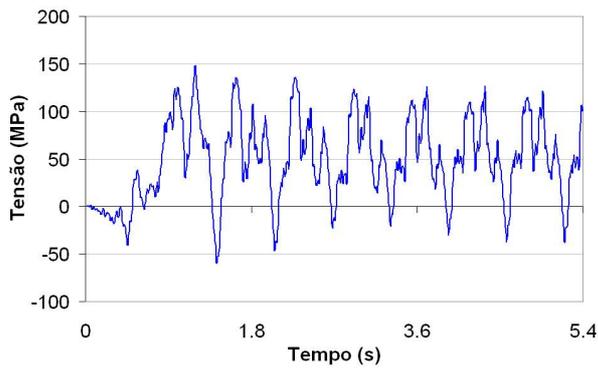
c) Histórico de tensões normais - Região 3

d) Hist. de tensões cisalhantes - Região 4

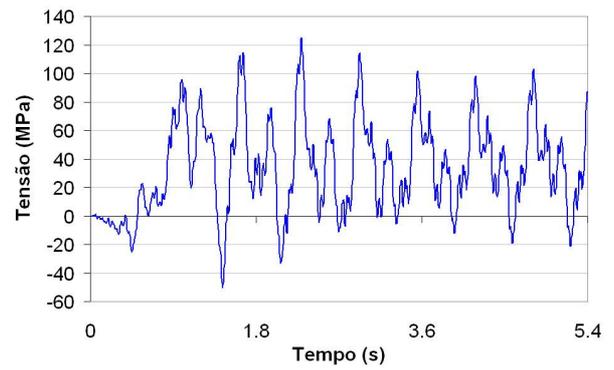


e) Histórico de tensões normais - Região 5

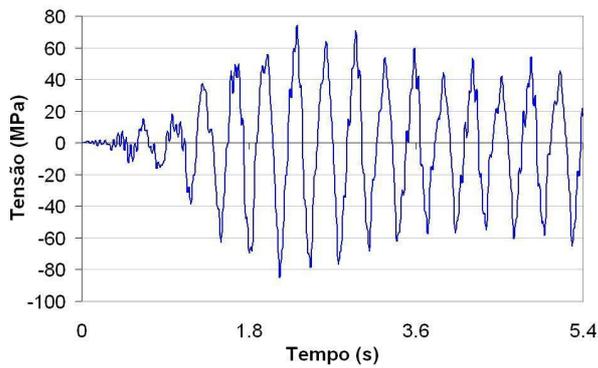
Figura 5.21 - Efeito da mobilidade de carga para o caso 4



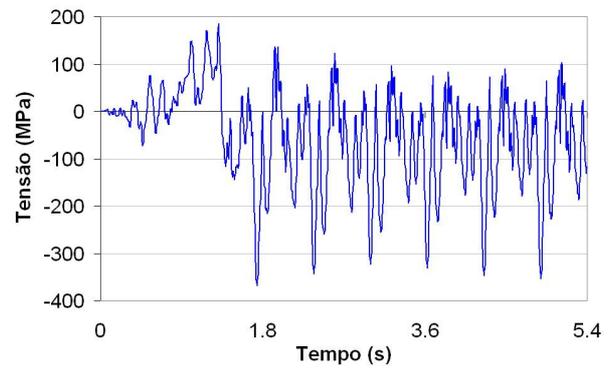
a) Histórico de tensões normais - Região 1



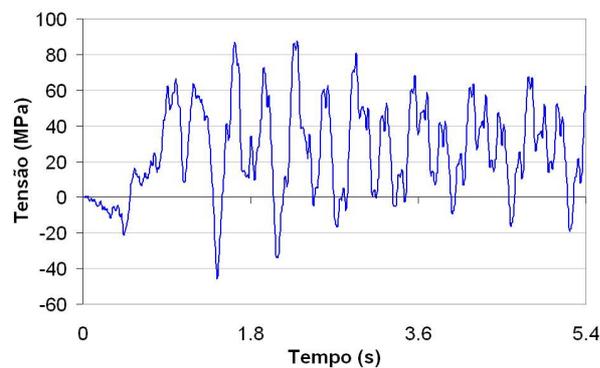
b) Histórico de tensões normais - Região 2



c) Histórico de tensões normais - Região 3



d) Hist. de tensões cisalhantes - Região 4



e) Histórico de tensões normais - Região 5

Figura 5.22 - Efeito das irregularidades da pista para o caso 4

#### 5.4.5. Análise global dos históricos de tensões apresentados

Observa-se nos gráficos de tensões referentes ao efeito da mobilidade da carga, figuras 5.15 , 5.17, 5.19 e 5.21, de uma forma geral, que as vigas mais próximas da passagem dos comboios apresentam valores mais elevados de tensão,

assim como um histórico mais sujeito aos eventuais impactos. Da mesma maneira este comportamento pode ser observado para as tensões devido à passagem dos comboios sobre o pavimento irregular da obra de arte investigada, figuras 5.16, 5.18, 5.20 e 5.22.

Naturalmente, os valores de tensão obtidos no meio do vão são maiores do que os demais. Isso ocorre devido aos maiores valores de momento fletor na seção central da ponte. Torna-se interessante observar esse comportamento e evidenciar que em algumas seções da obra de arte surgem concentrações de tensão, sendo estas seções consideradas como críticas para análise quanto à fadiga.

Pode-se notar uma ligeira diferença de comportamento para o efeito da mobilidade da carga nas vigas mais próximas dos pontos de aplicação de carga em relação às vigas mais distantes (Exemplo: figuras 5.15a e 5.15b). Esse efeito pode ser explicado pelo impacto dos pneus ao interagir com a estrutura, sendo a distância entre os dois picos que se apresentam no topo dos gráficos aproximadamente o tempo necessário para entrada do segundo eixo de um determinado veículo naquele ponto da estrutura, (Exemplo: figura 5.15a).

Gráficos contendo os valores de tensão cisalhante no apoio são apresentados, de forma a ilustrar o impacto da passagem dos veículos nos apoios da estrutura, figuras 5.15d, 5.16d, 5.17d, 5.18d, 5.19d, 5.20d, 5.21d e 5.22d. Nota-se claramente que a passagem do comboio II, de três veículos, (Exemplo: figura 5.19d) apresenta uma maior quantidade de picos e uma maior amplitude que a passagem do comboio I, de dois veículos (Exemplo: figura 5.15d). A diferença de tempo, entre um pico e o outro, é aproximadamente o tempo necessário para a entrada de um novo veículo na ponte, valendo essa afirmação também para os casos de tensão normal. Os valores de tensão cisalhante no apoio são muito maiores que os valores obtidos de tensão normal no meio do vão, o que demonstra a necessidade de se olhar com cuidado questões referentes a aparelhos e enrijecedores de apoio.

Os valores máximos de tensão dos gráficos associados ao efeito da mobilidade da carga, figuras 5.15, 5.17, 5.19 e 5.21, e das irregularidades da pista, figuras 5.16, 5.18, 5.20 e 5.22, em alguns casos apresentam amplitudes similares, porém a faixa de variação de tensão devido à passagem das irregularidades são muito maiores, mostrando a necessidade da análise a fadiga referente a este efeito em particular, uma vez que as faixas de variação de tensão são dados fundamentais para tais análises. Essas diferentes faixas de variação de tensão expõem a

necessidade de manutenção preventiva em estruturas reais, não só no que diz respeito à estrutura em si, mas principalmente no que diz respeito à qualidade do pavimento. Vale ressaltar que para o presente estudo foram consideradas irregularidades de pista consideradas de qualidade excelente.

Para a passagem dos comboios nas faixas laterais, figuras 5.17, 5.18, 5.21 e 5.22, observa-se nas vigas mais próximas do carregamento um aumento nos valores das amplitudes de tensão. Tal aumento demonstra a importância da distribuição do carregamento dinâmico sobre a obra e, bem como, a contribuição dos modos de vibração torsionais.

Outro aspecto interessante, para a passagem dos veículos na faixa lateral da ponte, diz respeito à viga lateral (viga 4, figura 5.11) oposta à faixa lateral de passagem do comboio, pois esta apresenta valores de tensões bem inferiores aos demais, figuras 5.17c, 5.18c, 5.21c e 5.22c. Deve-se ressaltar o fato de que caso ocorram carregamentos alternados entre a faixa lateral extrema da direita e a da esquerda, pode existir uma faixa de variação de tensão maior do que o normal, uma vez que em determinados momentos se tem uma tensão muito baixa e em outro uma muito elevada. Na referida viga, dependendo da combinação de carga que pode ocorrer sobre a obra, os valores de tensão podem ser consideravelmente amplificados. Tal fato acentua a importância da consideração dos efeitos de torção na modelagem numérica desse tipo de estrutura, especialmente para a análise quanto à fadiga.

No próximo capítulo, os valores das tensões obtidos através da passagem dos comboios no modelo tridimensional alvo desse estudo, conforme ilustrado anteriormente, serão utilizados para se analisar a fadiga de alguns elementos estruturais da ponte em questão, com principal foco no impacto causado pela passagem dos comboios na irregularidade do pavimento em relação apenas ao efeito da mobilidade da carga.

## **6. VERIFICAÇÃO À FADIGA**

### **6.1. Introdução**

No capítulo anterior foram apresentados os resultados obtidos para as análises propostas pelo presente estudo. Assim, nesse capítulo os valores obtidos pelas análises demonstradas no capítulo anterior são utilizados para que se possa fazer a análise dos elementos estruturais selecionados quanto à fadiga. A contagem dos ciclos, baseados nos históricos de tensão apresentados no capítulo anterior, são feitas pelo método Rainflow já descrito anteriormente. O impacto dos carregamentos dinâmicos sobre os elementos estruturais selecionados é avaliado de forma a se obter as tensões e as faixas de tensão máximas para cada análise proposta. Um comparativo entre as normas estruturais discriminadas no capítulo dois é desenvolvido com especial interesse entre a diferença dos valores obtidos para o efeito da mobilidade da carga e para cargas submetidas à irregularidade de pavimento.

### **6.2. Contagem de ciclos**

O trabalho apresentado utiliza o método Rainflow para contagem dos ciclos de tensões obtidos para cada elemento estrutural. No capítulo dois é demonstrado um exemplo de contagem de ciclos pelo método em questão, porém os resultados obtidos e demonstrados no capítulo anterior são complexos, com muitos picos de tensão e com valores muito diversificados. Dessa forma, a contagem manual dos ciclos de tensão se torna impossível. Para tal contagem foi utilizada uma rotina implementada no programa Matlab (2007) e validada com o exemplo do capítulo dois e com o trabalho apresentado por Ferreira (1999) e Pravia (2003). Valores idênticos aos publicados por esses autores foram obtidos e estão demonstrados na seqüência do texto pelas figuras 6.1 e 6.2 , assim com na tabela 6.1, através do comparativo referente ao trabalho de Pravia (2003).

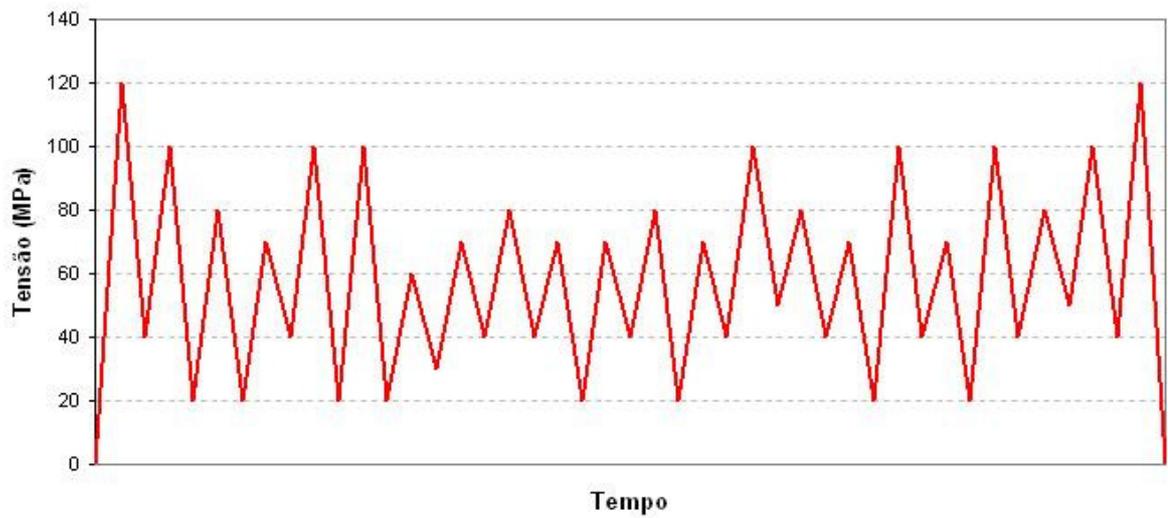


Figura 6.1 - Variação de tensão no tempo, Pravia (2003)

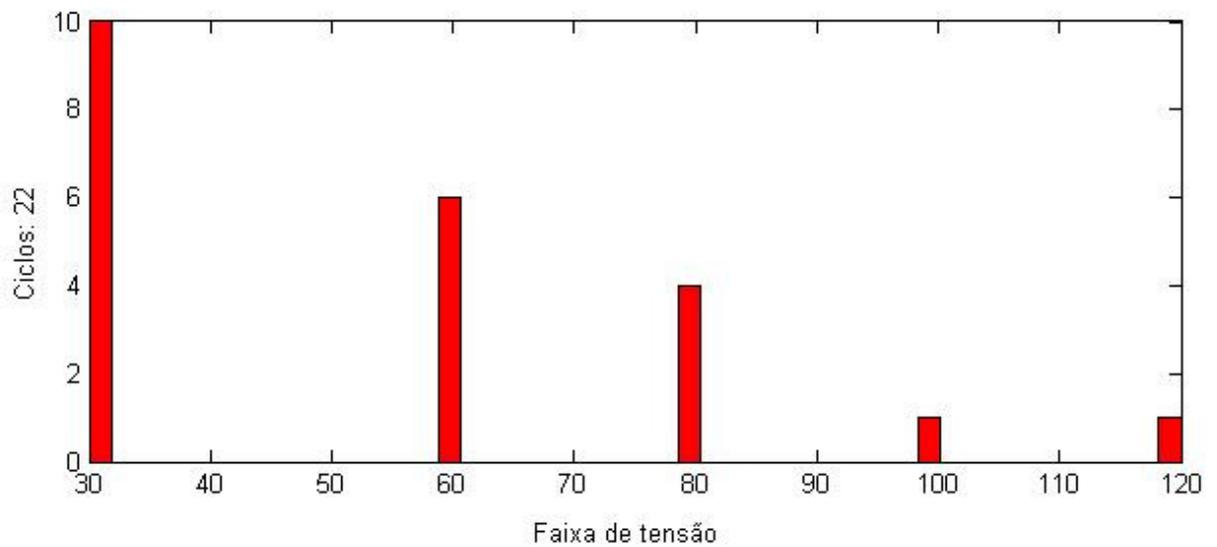


Figura 6.2 - Valores obtidos pela rotina do Matlab (2007)

Tabela 6.1 - Contagem dos ciclos com a rotina do Matlab (2007)

Faixa de tensão (MPa)	Ciclos inteiros	Meios ciclos
30	10	-
60	6	-
80	4	-
100	1	-
120	-	2

### 6.3. Análise da fadiga

Inicialmente, são escolhidos os detalhes estruturais que serão analisados. Naturalmente essa escolha não é aleatória, tendo que ser compatível com os locais aonde os respectivos históricos de tensão foram gerados. A partir desses históricos foi feita a contagem dos ciclos, pelo método Rainflow, e obtiveram-se os totais de ciclos, apenas para a fase permanente.

A fase permanente é de fundamental interesse para o presente estudo uma vez que a fadiga é causada por esforços repetitivos, principal característica dessa fase. Outro fator importante é que a fase permanente expressa o comportamento dinâmico da estrutura, ou seja, caracteriza a forma já estabilizada e amortecida com que a estrutura se comporta quando submetida a um carregamento. A figura 6.3 apresenta um gráfico de tensões ilustrando, a faixa de tensões de real interesse do presente estudo.

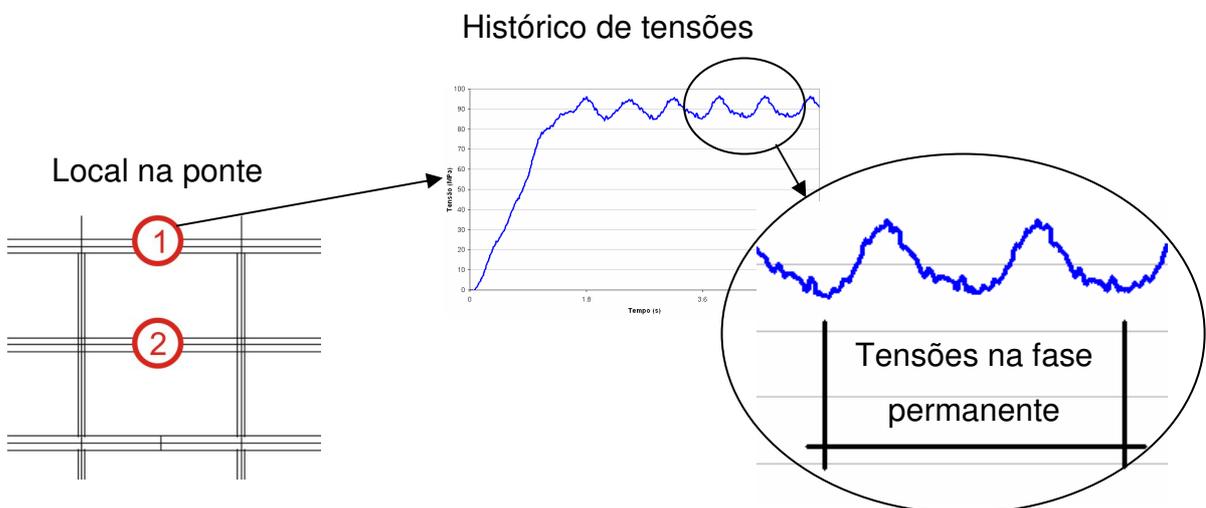
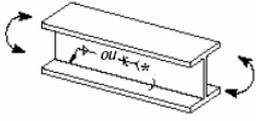
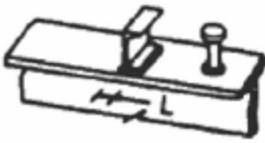
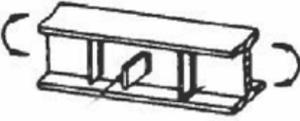


Figura 6.3 - Obtenção das tensões na fase permanente

Com os valores devidamente obtidos através da fase permanente do gráfico, foi feita a contagem dos ciclos conforme exemplo de contagem de ciclo exposto anteriormente. A incidência de cada ciclo associado a sua faixa de tensão é usada

de forma a se obter o seu valor correspondente proporcional a  $2 \times 10^6$  ciclos. De posse desses valores pode se, através das curvas S-N de cada norma se obter o dano e respectivamente a vida útil de cada elemento estrutural analisado. Os tipos de detalhe estrutural analisados nesse trabalho são apresentados na tabela 6.2 abaixo.

Tabela 6.2 - Tipos de detalhes estruturais analisados

Detalhe	Desenho	Tipo	Local	Elemento estrutural
1		Solda entre mesa e alma	Meio do vão	Viga 1, Viga 2 e Viga 4
2		Solda entre seções de perfis	Meio do vão	Viga 1, Viga 2 e Viga 4
3		Solda do pé dos conectores	Meio do vão	Viga 1, Viga 2 e Viga 4
4		Solda do pé dos enrijecedores	Meio do vão	Viga 1, Viga 2 e Viga 4
5		Solda do enrijecedor transversal	Meio do vão	Viga 1, Viga 2 e Viga 4

Talvez a tarefa de maior complexibilidade e que exige conhecimento do engenheiro responsável é a classificação dos detalhes apresentados. Cada norma possui, conforme descrito no capítulo dois, diferentes detalhes estruturais classificados conforme respectivas tabelas e figuras. A tabela 6.3 abaixo descreve a classe de detalhe adotada de acordo com as orientações de cada norma para o esse estudo.

Tabela 6.3 - Classificação geral dos detalhes

Detalhe	NBR 8800	AASHTO	EUROCODE	BS 5400
1	B	B	125	D
2	B	B	125	D
3	C	C	80	F2
4	C	C	80	F
5	D	D	71	G

Nos itens a seguir serão apresentados os cálculos pertinentes ao dano acumulado e as estimativas de vida útil para todos os elementos e pontos de análise, referentes à ponte mista em estudo, apresentados na tabela 6.2. São considerados cinco detalhes estruturais, tabela 6.2, três vigas diferentes (um, dois e quatro), figura 5.11, dois comboios (I e II), figura 3.11, duas passagens distintas (faixa lateral e central), figuras 5.13 e 5.14, dois tipos de carregamento (peso e irregularidade) e quatro normas distintas NBR 8800 (2008), AASHTO (2005), EUROCODE (2003) e BS 5400 (1980), totalizando 480 análises. No anexo A deste volume, as tabelas A.1 a A.16 apresentam exemplos de alguns cálculos de dano acumulado e de estimativa de vida útil, sendo que nas tabelas 6.5, 6.6, 6.8, 6.9, 6.11, 6.12, 6.14 e 6.15 são demonstradas as consolidações dos valores obtidos para tensão máxima, faixa de variação máxima e estimativa da vida útil.

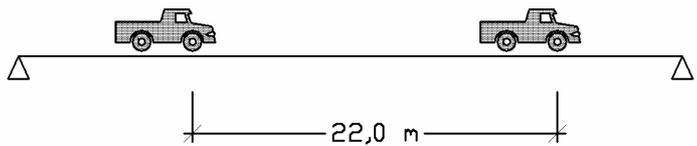
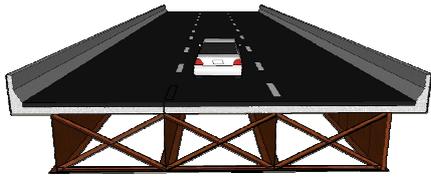
Os resultados apresentados na seqüência do texto foram analisados de acordo com as recomendações de cada norma, NBR 8800 (2008), AASHTO (2005), EUROCODE (2003) e BS 5400 (1980), utilizando-se as respectivas equações de curva S-N. Convém chamar a atenção do leitor para o fato de que um item específico foi elaborado para análise dos resultados.

#### 6.3.1. Comboio I com velocidade de 80km/h na faixa central da ponte - Caso 1

Para o presente estudo são considerados na análise cinco tipos distintos de detalhes estruturais e quatro normas de projeto diferentes NBR 8800 (2008), AASHTO (2005), EUROCODE (2003) e BS 5400 (1980). A tabela 6.4 ilustra o caso em estudo, caso 1, comboio I com velocidade de 80km/h na faixa central da ponte,

de forma a proporcionar uma melhor compreensão dos valores obtidos nas tabelas seguintes.

Tabela 6.4 - Tabela ilustrativa do caso 1

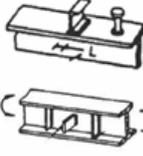
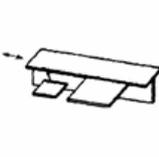
Caso 1	Comboio I	Faixa central da ponte
		

Os resultados, referentes à vida útil da ponte investigada no presente estudo são apresentadas nas tabelas 6.5 e 6.6 Deve-se ressaltar que para o cálculo são considerados os efeitos da mobilidade da carga (efeito do peso) e das irregularidades superficiais, considerando-se um pavimento de qualidade excelente.

Tabela 6.5 - Verificação à fadiga da ponte rodoviária em estudo, efeito da mobilidade de carga, caso 1

Detalhe	Viga	$\sigma$ máx (MPa)	$\Delta\sigma$ máx (MPa)	Norma			
				NBR 8800	AASTHO	EUROCODE	BS 5400
				Vida útil (anos)	Vida útil (anos)	Vida útil (anos)	Vida útil (anos)
1 e 2	1	63.03	12.00	19554.77	19555.02	19854.81	19853.57
	2	91.03	39.00	1065.71	1065.71	1082.05	1081.98
	4	53.52	12.00	25230.26	25230.61	25617.41	25615.81
3 e 4	1	63.03	12.00	7159.23	7165.20	4987.30	6134.89
	2	91.03	39.00	390.16	390.49	271.80	469.13
	4	53.52	12.00	9237.10	9244.80	6434.80	11106.61
5	1	63.03	12.00	3579.61	3587.57	3530.74	2836.22
	2	91.03	39.00	195.08	195.52	192.42	154.57
	4	53.52	12.00	4618.55	4628.82	4555.49	3659.40

Tabela 6.6 - Verificação à fadiga da ponte rodoviária em estudo, efeito das irregularidades da pista, caso 1

Detalhe	Viga	$\sigma$ máx (MPa)	$\Delta\sigma$ máx (MPa)	Norma			
				NBR 8800	AASHTO	EUROCODE	BS 5400
				Vida útil (anos)	Vida útil (anos)	Vida útil (anos)	Vida útil (anos)
	1	97.12	92.00	39.71	39.77	40.38	40.37
	2	113.53	108.00	33.10	33.15	33.66	33.66
	4	80.09	80.00	93.77	93.91	95.35	95.35
	1	97.12	92.00	28.42	28.45	19.80	34.17
	2	113.53	108.00	12.14	12.15	8.45	14.59
	4	80.09	80.00	34.36	34.39	23.94	41.31
	1	97.12	92.00	14.21	14.24	14.02	11.26
	2	113.53	108.00	6.07	6.08	5.99	4.81
	4	80.09	80.00	17.18	17.22	16.95	13.61

6.3.2. Comboio I com velocidade de 80km/h na faixa lateral da ponte - Caso 2

Analogamente ao tópico anterior a tabela 6.7 ilustra o caso 2, comboio I com velocidade de 80km/h na faixa lateral da ponte, de forma a proporcionar uma melhor compreensão dos valores obtidos nas tabelas seguintes.

Os resultados, referentes à vida útil da ponte investigada para o caso 2 são apresentadas nas tabelas 6.8 e 6.9

Tabela 6.7 - Tabela ilustrativa do caso 2

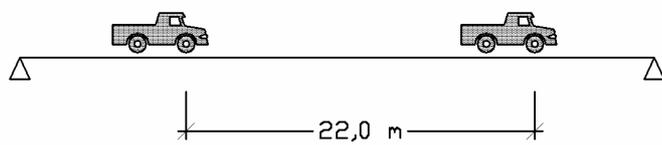
Caso 2	Comboio I	Faixa lateral da ponte
		

Tabela 6.8 - Verificação à fadiga da ponte rodoviária em estudo, efeito da mobilidade de carga, caso 2

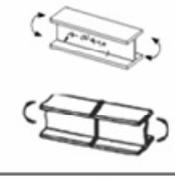
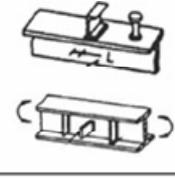
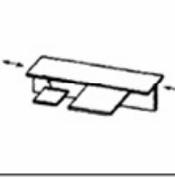
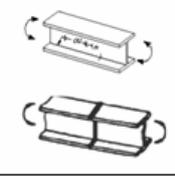
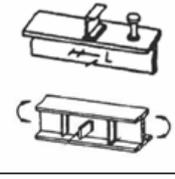
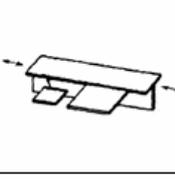
Detalhe	Viga	$\sigma$ máx (MPa)	$\Delta\sigma$ máx (MPa)	Norma			
				NBR 8800	AASTHO	EUROCODE	BS 5400
				Vida útil (anos)	Vida útil (anos)	Vida útil (anos)	Vida útil (anos)
	1 	130.32	22.00	3707.84	3707.85	3764.69	3764.46
	2 	99.92	46.00	674.54	675.57	685.93	685.89
	4 	6.19	6.00	76439.78	76441.65	77613.54	77608.70
	1 	130.32	22.00	2489.95	2492.03	1734.56	2993.89
	2 	99.92	46.00	247.33	247.54	172.30	297.39
	4 	6.19	6.00	27985.81	28009.15	19495.64	33649.89
	1 	130.32	22.00	1244.98	1247.74	1227.98	986.43
	2 	99.92	46.00	123.67	123.94	121.98	97.98
	4 	6.19	6.00	13992.91	14024.03	13801.86	11086.96

Tabela 6.9 - Verificação à fadiga da ponte rodoviária em estudo, efeito das irregularidades da pista, caso 2

Detalhe	Viga	$\sigma$ máx (MPa)	$\Delta\sigma$ máx (MPa)	Norma			
				NBR 8800	AASTHO	EUROCODE	BS 5400
				Vida útil (anos)	Vida útil (anos)	Vida útil (anos)	Vida útil (anos)
	1 	171.86	154.00	6.37	6.38	6.48	6.48
	2 	126.27	160.00	8.62	8.63	8.77	8.77
	4 	54.57	43.00	194.63	194.93	197.92	197.91
	1 	171.86	154.00	3.93	3.93	2.73	4.72
	2 	126.27	160.00	6.28	6.29	4.38	7.56
	4 	54.57	43.00	67.65	67.71	47.13	81.34
	1 	171.86	154.00	1.96	1.97	1.94	1.56
	2 	126.27	160.00	3.14	3.15	3.10	2.49
	4 	54.57	43.00	33.82	33.90	33.36	26.80

### 6.3.3. Comboio II com velocidade de 80km/h na faixa central da ponte - Caso 3

A tabela 6.10 ilustra o caso 3, comboio II com velocidade de 80km/h na faixa central da ponte, de forma a proporcionar uma melhor compreensão dos valores obtidos nas tabelas seguintes.

Os resultados, referentes à vida útil da ponte investigada no caso 3, são apresentados nas tabelas 6.11 e 6.12.

Tabela 6.10 - Tabela ilustrativa do caso 3

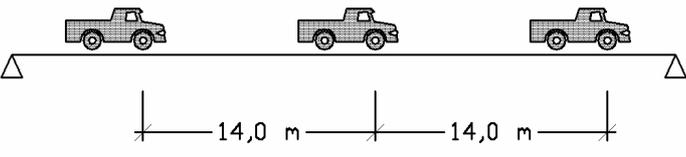
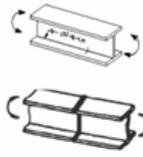
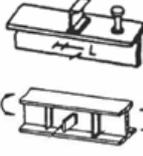
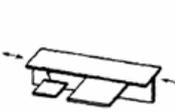
Caso 3	Comboio II	Faixa central da ponte
		

Tabela 6.11 - Verificação à fadiga da ponte rodoviária em estudo, efeito da mobilidade de carga, caso 3

Detalhe	Viga	$\sigma$ máx (MPa)	$\Delta\sigma$ máx (MPa)	Norma			
				NBR 8800	AASTHO	EUROCODE	BS 5400
				Vida útil (anos)	Vida útil (anos)	Vida útil (anos)	Vida útil (anos)
1 e 2	1	96.59	11.00	14133.05	14154.66	14371.66	14370.76
	2	127.95	52.00	566.57	567.44	576.14	576.10
	4	80.69	11.00	13625.83	13625.91	13834.81	13833.94
3 e 4	1	96.59	11.00	5182.12	5186.44	3610.00	6230.93
	2	127.95	52.00	207.74	207.92	144.72	249.79
	4	80.69	11.00	4988.54	4992.70	3475.15	5998.18
5	1	96.59	11.00	2591.06	2596.82	2555.68	2052.97
	2	127.95	52.00	103.87	104.10	102.45	82.30
	4	80.69	11.00	2494.27	2499.82	2460.21	1976.28

Tabela 6.12 - Verificação à fadiga da ponte rodoviária em estudo, efeito das irregularidades da pista, caso 3

Detalhe	Viga	$\sigma$ máx (MPa)	$\Delta\sigma$ máx (MPa)	Norma				
				NBR 8800	AASHTO	EUROCODE	BS 5400	
				Vida útil (anos)	Vida útil (anos)	Vida útil (anos)	Vida útil (anos)	
	1		92.65	45.00	234.57	234.93	238.53	238.52
	2		115.09	42.00	234.57	234.93	238.53	238.52
	4		88.51	32.00	625.39	626.35	635.95	635.91
	1		92.65	45.00	86.01	86.08	59.92	103.42
	2		115.09	42.00	219.69	219.87	153.04	264.15
	4		88.51	32.00	229.31	229.50	159.74	275.72
	1		92.65	45.00	43.00	43.10	42.42	34.07
	2		115.09	42.00	109.84	110.09	108.35	87.03
	4		88.51	32.00	114.65	114.91	113.09	90.84

#### 6.3.4. Comboio II com velocidade de 80km/h na faixa lateral da ponte - Caso 4

A tabela 6.13 ilustra o caso 4, comboio II com velocidade de 80km/h na faixa lateral da ponte, de forma a proporcionar uma melhor compreensão dos valores obtidos nas tabelas seguintes.

Os resultados, referentes à vida útil da ponte investigada para o caso 2 são apresentadas nas tabelas 6.14 e 6.15

Tabela 6.13 - Tabela ilustrativa do caso 4

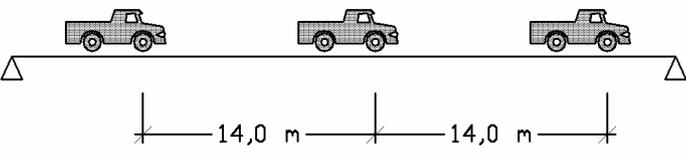
Caso 4	Comboio II	Faixa lateral da ponte
		

Tabela 6.14 - Verificação à fadiga da ponte rodoviária em estudo, efeito da mobilidade de carga, caso 4

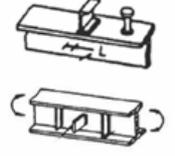
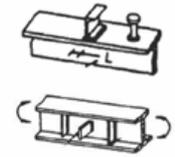
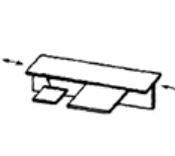
Detalhe	Viga	$\sigma$ máx (MPa)	$\Delta\sigma$ máx (MPa)	Norma			
				NBR 8800	AASHTO	EUROCODE	BS 5400
				Vida útil (anos)	Vida útil (anos)	Vida útil (anos)	Vida útil (anos)
	1	203.67	47.00	471.62	472.34	479.58	479.55
	2	147.93	46.00	265.98	266.39	270.47	270.46
	4	7.51	4.00	299463.16	299921.05	304519.00	304500.00
	1	203.67	47.00	172.93	173.07	120.47	207.93
	2	147.93	46.00	97.53	97.61	67.94	117.27
	4	7.51	4.00	109803.16	109894.74	76491.72	132026.32
	1	203.67	47.00	86.46	86.66	85.28	68.51
	2	147.93	46.00	48.76	48.87	48.10	38.64
	4	7.51	4.00	54901.58	55023.68	54151.99	43500.00

Tabela 6.15 - Verificação à fadiga da ponte rodoviária em estudo, efeito das irregularidades da pista, caso 4

Detalhe	Viga	$\sigma$ máx (MPa)	$\Delta\sigma$ máx (MPa)	Norma			
				NBR 8800	AASHTO	EUROCODE	BS 5400
				Vida útil (anos)	Vida útil (anos)	Vida útil (anos)	Vida útil (anos)
	1	148.06	146.00	8.27	8.29	8.41	8.41
	2	124.88	110.00	19.07	19.09	19.39	19.39
	4	73.91	75.00	32.49	32.54	33.04	33.04
	1	148.06	146.00	3.03	3.04	2.11	3.65
	2	124.88	110.00	6.99	7.00	4.87	8.41
	4	73.91	75.00	11.91	11.92	8.30	14.33
	1	148.06	146.00	1.52	1.52	1.50	1.20
	2	124.88	110.00	3.50	3.50	3.45	2.77
	4	73.91	75.00	5.96	5.97	5.88	4.72

### 6.3.5. Análise comparativa dos resultados obtidos ao longo da análise

É importante ressaltar que o objetivo principal desse capítulo é o de demonstrar o impacto dos diferentes fatores relacionados à passagem dos veículos sobre a ponte. Por outro lado, os valores relativamente baixos obtidos para vida útil dos elementos estruturais, não condenam necessariamente o projeto da estrutura investigada neste trabalho. Para que isso ocorra, detalhes mais precisos referentes a outros elementos de projeto, tais como processos construtivos, comprimentos efetivos, distancia entre pontos de solda, tipos de solda entre outros deveriam ser mapeados com maior detalhamento.

De acordo com as análises realizadas ao longo do presente trabalho, alguns aspectos relevantes foram observados e serão analisados de forma separada. Especial atenção é dada para a diferença entre os valores da vida útil da ponte quando os efeitos provenientes da mobilidade da carga e das irregularidades do pavimento são efetivamente comparados.

A diferença entre os valores obtidos pela passagem do comboio na faixa central e na faixa lateral da pista também é alvo de investigação, assim como os resultados apresentados para os pontos específicos de cada viga analisada. Um outro aspecto interessante diz respeito a influência da classificação dos detalhes na estimativa do dano acumulado e da vida útil da ponte. Finalmente, a diferença dos resultados apresentados para a passagem dos dois comboios adotados no presente estudo é discutida.

#### 6.3.5.1. Efeito da mobilidade de carga versus efeito das irregularidades de pista

Pode-se observar que as cargas dinâmicas oriundas das irregularidades de pavimento são de extrema importância, principalmente no que diz respeito à análise da fadiga das pontes rodoviárias. Na maioria dos casos analisados, os valores de dano crescem muito quando comparados aos valores apenas da carga móvel.

A tabela 6.16, na seqüência do texto, apresenta o comparativo entre os valores encontrados para mobilidade de carga e para a irregularidade da pista.

Tabela 6.16 - Efeito da mobilidade da carga e da irregularidade pista

Caso	Detalhe	Viga	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)		$\Delta\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)		Vida útil (anos - AASTHO)	
			Mobilidade	Irregularidade	Mobilidade	Irregularidade	Mobilidade	Irregularidade
Caso 1	1 e 2	1	63.03	97.12	12.00	92.00	19555.02	39.77
		2	91.03	113.53	39.00	108.00	1065.71	33.15
		4	53.52	80.09	12.00	80.00	25230.61	93.91
	3 e 4	1	63.03	97.12	12.00	92.00	7165.20	28.45
		2	91.03	113.53	39.00	108.00	390.49	12.15
		4	53.52	80.09	12.00	80.00	9244.80	34.39
	5	1	63.03	97.12	12.00	92.00	3587.57	14.24
		2	91.03	113.53	39.00	108.00	195.52	6.08
		4	53.52	80.09	12.00	80.00	4628.82	17.22
Caso 2	1 e 2	1	130.32	171.86	22.00	154.00	3707.85	6.38
		2	99.92	126.27	46.00	160.00	675.57	8.63
		4	6.19	54.57	6.00	43.00	76441.65	194.93
	3 e 4	1	130.32	171.86	22.00	154.00	2492.03	3.93
		2	99.92	126.27	46.00	160.00	247.54	6.29
		4	6.19	54.57	6.00	43.00	28009.15	67.71
	5	1	130.32	171.86	22.00	154.00	1247.74	1.97
		2	99.92	126.27	46.00	160.00	123.94	3.15
		4	6.19	54.57	6.00	43.00	14024.03	33.90
Caso 3	1 e 2	1	96.59	92.65	11.00	45.00	14154.66	234.93
		2	127.95	115.09	52.00	42.00	567.44	234.93
		4	80.69	88.51	11.00	32.00	13625.91	626.35
	3 e 4	1	96.59	92.65	11.00	45.00	5186.44	86.08
		2	127.95	115.09	52.00	42.00	207.92	219.87
		4	80.69	88.51	11.00	32.00	4992.70	229.50
	5	1	96.59	92.65	11.00	45.00	2596.82	43.10
		2	127.95	115.09	52.00	42.00	104.10	110.09
		4	80.69	88.51	11.00	32.00	2499.82	114.91
Caso 4	1 e 2	1	203.67	148.06	47.00	146.00	472.34	8.29
		2	147.93	124.88	46.00	110.00	266.39	19.09
		4	7.51	73.91	4.00	75.00	299921.05	32.54
	3 e 4	1	203.67	148.06	47.00	146.00	173.07	3.04
		2	147.93	124.88	46.00	110.00	97.61	7.00
		4	7.51	73.91	4.00	75.00	109894.74	11.92
	5	1	203.67	148.06	47.00	146.00	86.66	1.52
		2	147.93	124.88	46.00	110.00	48.87	3.50
		4	7.51	73.91	4.00	75.00	55023.68	5.97

É interessante observar que muitas vezes o efeito da mobilidade da carga apresentou valores maiores de tensão, porém com faixas de tensão bem menores que as apresentadas pelas irregularidades de pavimento.

Observando-se os resultados apresentados na tabela 6.16 verifica-se que o maior valor de tensão obtido para mobilidade de carga, viga 1, caso 4, é de 203,67 MPa ( $\sigma_{\text{máx}} = 203,67$  MPa), enquanto o maior valor de tensão para irregularidade do pavimento, viga 1, caso 2, é de 171,86 MPa ( $\sigma_{\text{máx}} = 171,86$  MPa). Para o mesmo caso de mobilidade de carga, viga 1, caso 4, a faixa de variação de tensão obtida foi de 47 MPa ( $\Delta\sigma_{\text{máx}} = 47$  MPa) enquanto para a irregularidade da pista, viga 1, caso 2, foi bem maior, 154 MPa ( $\Delta\sigma_{\text{máx}} = 154$  MPa).

Pode-se notar claramente a influência de uma maior faixa de variação de tensão quando observamos, para os respectivos casos, a diferença da vida útil calculada através do dano acumulado para cada caso, sendo para a maior tensão causada pela mobilidade de carga, aproximadamente 173 anos e para a irregularidade de pista, com uma tensão máxima menor, porém com maior faixa de variação de tensão, aproximadamente 2 anos.

O valor de faixa de tensão admissível apresentado por Pinho e Belley (2007), para os detalhes estruturais 1 e 2 é 162 MPa ( $\Delta\sigma_{\text{máx}} = 162$  MPa) e para os detalhes 3 e 4, é 112 MPa ( $\Delta\sigma_{\text{máx}} = 112$  MPa). Esses valores, calculados segundo AASHTO (2005), demonstram que o efeito da mobilidade da carga sobre a estrutura não se apresenta crítico e está abaixo dos valores limites desses detalhes estruturais, porém, dependendo do caso de carregamento, os valores obtidos para a passagem dos comboios sobre a irregularidade do pavimento apresentam valores superiores aos valores limites.

Dessa forma, observa-se que valores elevados de faixas de variação de tensão impactam diretamente na diminuição da vida útil do elemento estrutural analisado.

Os valores da mobilidade da carga e das irregularidades de pavimento são apresentados separadamente, porém carregamentos reais estão sobre a ação de ambas as cargas ao mesmo tempo, podendo elevar ainda mais os valores de tensão obtidos nesse estudo. Tais constatações orientam não apenas para uma manutenção periódica das estruturas de pontes rodoviárias mistas, como também para a manutenção da qualidade do pavimento uma vez que os valores obtidos são apenas para irregularidades de pavimento consideradas excelentes, Silva (1996) e Almeida (2006).

#### 6.3.5.2. Variação da posição do carregamento sobre a ponte

Outro aspecto interessante observado ao longo da análise foi à diferença entre os valores obtidos pela passagem dos comboios na faixa central, tabelas 6.5, 6.6, 6.11 e 6.12, e na faixa lateral, tabelas 6.8, 6.9, 6.14 e 6.15. Pode-se perceber que os carregamentos oriundos da passagem dos comboios pela faixa lateral, de

uma forma geral, produzem tensões mais elevadas em determinados pontos da estrutura, produzindo assim faixas maiores de variação de tensão, conforme apresentado na tabela 6.17 a seguir. A tabela 6.17, apresenta o comparativo entre os valores encontrados para passagem dos comboios nas faixas central e lateral da pista.

Tabela 6.17 - Efeito da passagem pela faixa central e pela faixa lateral

Caso	Detalhe	Viga	$\sigma$ máx (MPa)		$\Delta\sigma$ máx (MPa)		Vida útil (anos - AASTHO)	
			Central	Lateral	Central	Lateral	Central	Lateral
Comboio I (Casos 1 e 2)	1 e 2	1	63.03	130.32	12.00	22.00	19555.02	3707.85
		2	91.03	99.92	39.00	46.00	1065.71	675.57
		4	53.52	6.19	12.00	6.00	25230.61	76441.65
	3 e 4	1	63.03	130.32	12.00	22.00	7165.20	2492.03
		2	91.03	99.92	39.00	46.00	390.49	247.54
		4	53.52	6.19	12.00	6.00	9244.80	28009.15
	5	1	63.03	130.32	12.00	22.00	3587.57	1247.74
		2	91.03	99.92	39.00	46.00	195.52	123.94
		4	53.52	6.19	12.00	6.00	4628.82	14024.03
Comboio I (Casos 1 e 2)	1 e 2	1	97.12	171.86	92.00	154.00	39.77	6.38
		2	113.53	126.27	108.00	160.00	33.15	8.63
		4	80.09	54.57	80.00	43.00	93.91	194.93
	3 e 4	1	97.12	171.86	92.00	154.00	28.45	3.93
		2	113.53	126.27	108.00	160.00	12.15	6.29
		4	80.09	54.57	80.00	43.00	34.39	67.71
	5	1	97.12	171.86	92.00	154.00	14.24	1.97
		2	113.53	126.27	108.00	160.00	6.08	3.15
		4	80.09	54.57	80.00	43.00	17.22	33.90
Comboio II (Casos 3 e 4)	1 e 2	1	96.59	203.67	11.00	47.00	14154.66	472.34
		2	127.95	147.93	52.00	46.00	567.44	266.39
		4	80.69	7.51	11.00	4.00	13625.91	299921.05
	3 e 4	1	96.59	203.67	11.00	47.00	5186.44	173.07
		2	127.95	147.93	52.00	46.00	207.92	97.61
		4	80.69	7.51	11.00	4.00	4992.70	109894.74
	5	1	96.59	203.67	11.00	47.00	2596.82	86.66
		2	127.95	147.93	52.00	46.00	104.10	48.87
		4	80.69	7.51	11.00	4.00	2499.82	55023.68
Comboio II (Casos 3 e 4)	1 e 2	1	92.65	148.06	45.00	146.00	234.93	8.29
		2	115.09	124.88	42.00	110.00	234.93	19.09
		4	88.51	73.91	32.00	75.00	626.35	32.54
	3 e 4	1	92.65	148.06	45.00	146.00	86.08	3.04
		2	115.09	124.88	42.00	110.00	219.87	7.00
		4	88.51	73.91	32.00	75.00	229.50	11.92
	5	1	92.65	148.06	45.00	146.00	43.10	1.52
		2	115.09	124.88	42.00	110.00	110.09	3.50
		4	88.51	73.91	32.00	75.00	114.91	5.97

Pode-se perceber o impacto da análise dinâmica e conseqüentemente o impacto causado pela variação do posicionamento dos veículos na ponte, ao se comparar os valores encontrados por Pinho e Belley (2007) para o efeito da mobilidade da carga na viga 2 (mais central), tensão máxima de 90.50 MPa ( $\sigma_{\text{máx}} = 90,50$  MPa), com os valores de tensão máxima encontrados pelo presente estudo para a mesma viga, de 91.03 MPa ( $\sigma_{\text{máx}} = 91,03$  MPa, casos 1 e 2) a 147.93 MPa ( $\sigma_{\text{máx}} = 147,93$  MPa, casos 3 e 4).

Dessa forma, a passagem pela faixa lateral se demonstrou mais crítica que a passagem pela faixa central para a análise quanto à fadiga. Da mesma maneira que foi percebida uma maior concentração de tensões em determinados pontos da estrutura, em relação a outros pontos que apresentaram tensões bem menores.

Aparentemente esses casos podem parecer de pequeno interesse para a análise a fadiga, porém a passagem alternada entre os comboios pelas faixas lateral da esquerda e da direita, podem produzir grandes efeitos na variação das faixas de tensão desses pontos, hora carregados e hora sem carga alguma.

#### 6.3.5.3. Influência das classes de detalhes estruturais

Notou-se pela diferença da vida útil apresentada para cada detalhe estrutural que a correta classificação do mesmo é de fundamental importância. Grandes diferenças entre os valores de cada classe puderam ser observadas. Tal comportamento orienta para uma análise cautelosa do comportamento de cada elemento, com especial interesse na sua ligação estrutural e aos esforços atuantes no mesmo.

A classificação dos detalhes estruturais, de acordo com a diferença dos resultados expostos nas tabelas 6.5, 6.6, 6.8, 6.9, 6.11, 6.12, 6.14 e 6.15, deve ser feita com muita cautela por parte dos engenheiros estruturais, para que outros detalhes relevantes, associados, por exemplo, aos processos construtivos, comprimentos efetivos, distancia entre pontos de solda, tipos de solda entre outros, possam ser devidamente considerados na análise.

A influência das classes de detalhes estruturais pode ser também observada nas tabelas 6.16 e 6.17.

#### 6.3.5.4. Comportamento estrutural das vigas de aço

Os diferentes pontos de análise adotados no presente estudo puderam demonstrar os comportamentos distintos para cada viga de aço analisada, figura 5.11. Foi interessante observar que o comportamento dessas peças estruturais está ligado diretamente à forma como o carregamento se apresenta sobre a estrutura. Variações da faixa de tráfego, efeitos dinâmicos oriundos das irregularidades do pavimento, também contribuem para a mudança de comportamento dessas peças.

Em alguns casos muito específicos, os valores do dano acumulado e, bem como, da vida útil da ponte, devidos ao efeito da mobilidade da carga apresentaram resultados (máxima variação das tensões) mais um pouco mais críticos do que aqueles referentes ao efeito das irregularidades, tabelas 6.11 e 6.12. Tal fato pode ser explicado justamente pelo caráter não-determinístico das irregularidades superficiais. Dessa forma, o presente estudo, demonstra a real importância de uma correta simulação, ou para casos de estruturas reais, de uma medição experimental feita in situ.

O Comportamento estrutural das vigas de aço pode ser também observado nas tabelas 6.16 e 6.17.

#### 6.3.5.5. Efeito do número de veículos trafegando sobre a obra de arte

Pode-se perceber a diferença entre a passagem dos diferentes comboios sobre a estrutura da ponte em questão. O comboio II, figura 3.11, que aparentemente produz maior carregamento na estrutura, em muitos casos foi menos crítico para a verificação à fadiga da ponte, apresentando menores faixas de variação de tensão. O mesmo comboio II, figura 3.11, na teoria, possui uma frequência de excitação mais perto da frequência fundamental da ponte, ou seja,

produz maior impacto nas amplitudes de vibração da mesma. Dessa forma pode se perceber que o comboio em questão apresentou maiores valores de tensão máxima.

A tabela 6.18 apresenta o comparativo entre os valores encontrados para a passagem do comboio I e para a passagem do comboio II.

Tabela 6.18 - Efeito da passagem dos comboios

Caso	Detalhe	Viga	$\sigma$ máx (MPa)		$\Delta\sigma$ máx (MPa)		Vida útil (anos - AASTHO)	
			Comboio I	Comboio II	Comboio I	Comboio II	Comboio I	Comboio II
Faixa central (Casos 1 e 3)	1 e 2	1	63.03	96.59	12.00	11.00	19555.02	472.34
		2	91.03	127.95	39.00	52.00	1065.71	266.39
		4	53.52	80.69	12.00	11.00	25230.61	299921.05
	3 e 4	1	63.03	96.59	12.00	11.00	7165.20	173.07
		2	91.03	127.95	39.00	52.00	390.49	97.61
		4	53.52	80.69	12.00	11.00	9244.80	109894.74
	5	1	63.03	96.59	12.00	11.00	3587.57	86.66
		2	91.03	127.95	39.00	52.00	195.52	48.87
		4	53.52	80.69	12.00	11.00	4628.82	55023.68
Faixa central (Casos 1 e 3)	1 e 2	1	97.12	92.65	92.00	45.00	39.77	234.93
		2	113.53	115.09	108.00	42.00	33.15	234.93
		4	80.09	88.51	80.00	32.00	93.91	626.35
	3 e 4	1	97.12	92.65	92.00	45.00	28.45	86.08
		2	113.53	115.09	108.00	42.00	12.15	219.87
		4	80.09	88.51	80.00	32.00	34.39	229.50
	5	1	97.12	92.65	92.00	45.00	14.24	43.10
		2	113.53	115.09	108.00	42.00	6.08	110.09
		4	80.09	88.51	80.00	32.00	17.22	114.91
Faixa lateral (Casos 2 e 4)	1 e 2	1	130.32	203.67	22.00	47.00	3707.85	472.34
		2	99.92	147.93	46.00	46.00	675.57	266.39
		4	6.19	7.51	6.00	4.00	76441.65	299921.05
	3 e 4	1	130.32	203.67	22.00	47.00	2492.03	173.07
		2	99.92	147.93	46.00	46.00	247.54	97.61
		4	6.19	7.51	6.00	4.00	28009.15	109894.74
	5	1	130.32	203.67	22.00	47.00	1247.74	86.66
		2	99.92	147.93	46.00	46.00	123.94	48.87
		4	6.19	7.51	6.00	4.00	14024.03	55023.68
Faixa lateral (Casos 2 e 4)	1 e 2	1	171.86	148.06	154.00	146.00	6.38	8.29
		2	126.27	124.88	160.00	110.00	8.63	19.09
		4	54.57	73.91	43.00	75.00	194.93	32.54
	3 e 4	1	171.86	148.06	154.00	146.00	3.93	3.04
		2	126.27	124.88	160.00	110.00	6.29	7.00
		4	54.57	73.91	43.00	75.00	67.71	11.92
	5	1	171.86	148.06	154.00	146.00	1.97	1.52
		2	126.27	124.88	160.00	110.00	3.15	3.50
		4	54.57	73.91	43.00	75.00	33.90	5.97

O comportamento diferenciado entre os comboios quando analisados a fadiga, pode ser explicado pela maior presença de veículos transitando pela ponte

para o comboio II, figura 3.11. O comboio I, figura 3.1, por apresentar menos veículos trafegando na ponte para um mesmo intervalo de tempo, representou nesse presente estudo, uma maior variação de tensão oriunda do maior valor de carregamento e descarregamento da ponte, ou seja, quanto mais tempo a ponte ficou sem carga, mais ela se descarregou, gerando uma maior faixa de variação de tensão ao receber novo carregamento.

Pode-se perceber que os valores encontrados não estão associados de forma direta a quantidade de veículos de cada comboio, apresentando variações de tensão para um determinado comboio em alguns casos maiores e em outros menores do que as variações do outro comboio.

No próximo capítulo serão feitas as considerações finais sobre o presente estudo como também serão sugeridas melhorias para trabalhos futuros. Deve-se ressaltar que os cálculos completos para o dano acumulado e estimativa de vida útil estão apresentados nas tabelas A.1 a A.72 apresentadas no anexo A ao final deste trabalho.